



Luís André Lima Marques

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Análise Experimental da Influência dos Parâmetros de Pressurização na Qualidade de Peças Termoplásticas Produzidas por Injecção

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado,
Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela
de Matos, Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira
Arguente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos
Vogais: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado
Engenheiro José Miguel Botas Ferreira de Araújo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2016

***Análise experimental da influência dos parâmetros de pressurização na qualidade de peças
termoplásticas produzidas por injeção***

Copyright © 2016 Luís André Lima Marques

Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais e irmã

Agradecimentos

Este trabalho é individual mas toda a sua realização contou com o apoio e colaboração de várias pessoas. Todas elas sabem que foram uma mais-valia e quero aproveitar para registar a ajuda crucial que foram para a conclusão da etapa mais importante da minha vida académica. Agradeço especialmente:

À professora Carla Machado pela oportunidade de realizar este desafiante trabalho como seu orientando, assim como todo o apoio, disponibilidade e colaboração dado na elaboração desta dissertação e à sua amizade demonstrada.

À minha co-orientadora professora Ana Sofia Matos pela ajuda e disponibilidade, principalmente na parte estatística do trabalho.

À Delphi Seixal por ter disponibilizado as suas instalações e equipamentos, em particular aos operadores, engenheiros, técnicos, treinadores e programadores da área dos plásticos onde foi realizada toda a componente experimental desta dissertação.

Ao meu colega e amigo André Cabreirinha que esteve presente em toda esta jornada à qual foi uma grande ajuda.

Ao meu colega e amigo Sebastião Silva pela disponibilidade e ajuda nas simulações em Moldex3D.

Aos meus colegas que me acompanharam nestes 5 anos, aos amigos que fiz nesta instituição e aos velhos amigos que certamente me acompanharão por toda a vida o meu sincero agradecimento por todos os momentos bem passados.

Por último mas sem dúvida os grandes pilares da realização desta dissertação e a que lhes dedico a mesma, o meu muito obrigado à minha família por todo o apoio demonstrado não apenas na realização deste documento, mas em todo o meu percurso académico, espero que tenham tanto orgulho em mim como tenho neles.

A todos os que contribuíram directa ou indirectamente na realização desta dissertação o meu muito obrigado!

Actualmente, e devido à globalização, as empresas são cada vez mais pressionadas a reduzir os seus custos produtivos, com o objectivo de superar a forte concorrência. A indústria automóvel é uma das mais competitivas, com principal destaque para motores e componentes electrónicos, sendo crucial antecipar falhas e defeitos na produção, e a utilização de métodos estatísticos e de simulação pode contribuir para essa finalidade.

O processo de injeção de plásticos engloba todas as actividades desde a entrada da matéria-prima na tremonha sob a forma de granulado até à sua extracção como uma peça moldada. A compreensão de cada etapa é essencial para garantir não só a qualidade da peça moldada, mas a consistência ao longo da produção. A fase de pressurização é a etapa do processo que tem maior influência nas propriedades finais do produto, nomeadamente massa, resistência ao impacto e requisitos dimensionais das peças. A utilização dos valores correctos nos parâmetros desta fase é então fundamental para a obtenção das características funcionais ideais para o produto injectado.

O trabalho que conduziu a esta dissertação foi realizado em parceria com a *Delphi Automotive Systems, SA*, uma das principais empresas produtoras de componentes electrónicos para a indústria automóvel. Pretendeu-se realizar o estudo dos parâmetros de pressurização utilizados na injeção de componentes plásticos para caracterização desta fase do processo. Enquanto objectivo tecnológico, pretendeu-se demonstrar que as metodologias utilizadas, nomeadamente a Metodologia de Superfície de Resposta e a simulação do processo de injeção através do *software Moldex3D*, são facilitadoras da instalação de novos moldes nas máquinas injectoras.

A aplicação da metodologia de Superfície de Resposta demonstrou-se eficaz para realização da análise da influência dos parâmetros de pressurização. Os valores obtidos experimentalmente são idênticos aos resultados da simulação. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios o que indica que a utilização destas ferramentas é promissora para a optimização da preparação de moldes.

Palavras-chave: Molde de injeção; Pressurização; Simulação; Metodologia de Resposta em superfície.

Nowadays, due to globalization, companies are increasingly being forced to reduce their production costs in order to overcome the strong competition. The automotive industry is one of the most competitive, mainly in motor and electronic components production where it is crucial to anticipate failures and defects, thus the use of statistical methods and simulation can contribute to this purpose.

The plastic injection process involves all activities since the entry of the material at the hopper in the form of granulate to its extraction as a moulded part. Understanding each step is essential to ensure not only the quality of the moulded part, but the consistency throughout the production. The pressurization phase is the one with more influence on the final properties of the product, including weight, impact resistance and dimensional requirements of the parts. Optimal values for the parameters on this stage are therefore critical for obtaining better functional features on the injected product.

The work that led to this thesis was carried out in partnership with *Delphi Automotive Systems, SA*, one of the leading producers of electronic components for the automotive industry. The objective was to characterize the pressurization phase of polymeric components injection moulding by carrying out a systematic study of pressurization parameters. The technological purpose was to demonstrate that the methodologies used, including the Response Surface Methodology and simulation of the injection process using *Moldex3D* software assists the installation of moulds in moulding machines.

Application of response surface methodology has been shown to be effective to perform the analysis of the influence of pressurization parameters. The values obtained experimentally are identical to simulation results. The results obtained were very satisfactory indicating that the use of these tools is promising for optimizing the preparation of moulds.

Keywords: Injection mould; Pressurization phase; Simulation; Response surface methodology

1. Introdução, Objectivos e Estrutura.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Contextualização do trabalho na empresa Delphi	2
1.2.1 Bobinas de ignição	2
1.3 Motivação e Objectivos.....	4
1.4 Estrutura da Dissertação.....	5
2. Revisão do Estado da Arte.....	7
2.1 Moldes	7
2.1.1 Tipos de moldes	8
2.1.2 A forma da cavidade	10
2.1.3 Número de cavidades do Molde	11
2.1.4 Linha de separação.....	11
2.1.5 Sistema de alimentação.....	12
2.1.6 Ventilação do molde	13
2.1.7 Arrefecimento	14
2.1.8 Extracção	16
2.2 Polímeros	17
2.2.1 Propriedades	17
2.2.2 Morfologia dos Polímeros (Polímeros amorfos e cristalinos).....	18
2.2.3 Papel da morfologia na moldação por injeccção	18
2.2.4 Diferenças na contracção entre materiais amorfos e cristalinos.....	19
2.2.5 Contracção e Empeno nas peças	20
2.2.6 Intervalo de processamento do fundido	22
2.2.7 Velocidade de enchimento do molde	22
2.3 Máquina injectora	23
2.3.1 Fuso e bico de injeccção	26
2.3.2 Anel de bloqueio	29
2.3.3 Pressão de injeccção	30
2.3.4 Taxa de intensificação (<i>Intensification Ratio</i>)	32
2.4 Receptores de material/Aspiradores.....	33
2.5 Desumificadores	34
2.5.1 Humidade relativa e Ponto de Orvalho	35

2.5.2	Tempo de residência.....	36
2.5.3	Taxa de fluxo de ar	36
2.6	Controladores de temperatura.....	36
2.7	Ciclo de moldação por injeção.....	37
2.8	Fase de pressurização.....	42
3.	Metodologias e Procedimento Experimental.....	45
3.1	Bill of Process	45
3.2	Folha de Setup.....	45
3.3	Equipamento utilizado na validação.....	46
3.3.1	Molde	46
3.3.2	Máquina injectora.....	46
3.3.3	Material	48
3.4	Preparação do Molde.....	49
3.4.1	Estudo da Viscosidade.....	49
3.4.2	Estudo do Balanceamento das Cavidades.....	52
3.4.3	Estudo da Queda de Pressão	54
3.4.4	Estudo da Janela de Processo	57
3.4.5	Estudo da Solidificação do Ponto de Injecção.....	59
3.4.6	Estudo do Tempo de Arrefecimento	60
3.5	Desenho de Experiências (DOE) e Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) 61	
3.6	Máquina de medição por coordenadas (CMM).....	66
3.7	Teste de resistência mecânica (Ball Test)	68
3.8	Simulação.....	70
3.8.1	SolidWorks.....	71
3.8.2	Moldex 3D.....	75
4.	Apresentação e Discussão de Resultados	81
4.1	Resultados da preparação do molde.....	81
4.2	Resultados da metodologia de superfície de resposta.....	83
4.2.1	Diâmetro interior na zona dos terminais (KPC1)	84
4.2.2	Espessura do corte na secção C (QCI3).....	86
4.2.3	Comprimento da peça (QCI4)	87
4.2.4	Diâmetro exterior do corte na secção C (QCI6)	89
4.2.5	Diâmetro exterior da base da peça (QCI11)	90
4.2.6	Comprimento da torre (QCI12)	92
4.2.7	Massa (QCI10)	93

4.3	<i>Resultados das simulações</i>	95
4.3.1	Enchimento/Injecção	95
4.3.2	Compactação/Pressurização	100
4.3.3	Refrigeração	105
5.	<i>Conclusões e Trabalho Futuro</i>	113
5.1	<i>Conclusões e contribuições</i>	113
5.2	<i>Sugestão para trabalhos futuros</i>	114

Índice de Figuras

Figura 1.1: Bobina de ignição do tipo <i>pencil coil</i> da BMW	3
Figura 1.2: Representação esquemática do funcionamento electromagnético da bobina de ignição. 3	
Figura 2.1: Molde de 2 placas/convencional.....	9
Figura 2.2: Molde de 3 placas	9
Figura 2.3: Molde de canais quentes	9
Figura 2.4: Ilustração de uma Máquina Injectora.....	10
Figura 2.5: Ilustração de um molde básico com uma cavidade.....	10
Figura 2.6: Placa Suporte com postigo.....	10
Figura 2.7: Ilustração de um molde básico com 2 cavidades	11
Figura 2.8: Ilustração de um molde básico mostrando a linha de separação	12
Figura 2.9: Ilustração de placa de suporte com pontos de injeção	13
Figura 2.10: Ilustração do sistema de alimentação de dois moldes básicos.....	13
Figura 2.11: Tipos de secções transversais dos canais de alimentação	13
Figura 2.12: Defeitos numa peça.....	14
Figura 2.13: Configurações dos canais de refrigeração	15
Figura 2.14: Refrigeração num molde de injeção.....	16
Figura 2.15: Tipos de refrigeração nos machos	16
Figura 2.16: Exemplo de um sistema de extracção utilizado num molde convencional.....	16
Figura 2.17: Exemplo de um sistema de extracção utilizado num molde de 3 placas	17
Figura 2.18: Arranjo das moléculas em polímeros amorfos e semicristalinos.....	18
Figura 2.19: Efeito da temperatura no volume específico nas diferentes fases do processo de injeção	19
Figura 2.20: Efeito de variáveis de processo na contracção volumétrica.....	21
Figura 2.21: Empeno numa peça.....	21
Figura 2.22: Transições térmicas e gamas de processamento para polímeros amorfos e semicristalinos.....	22

Figura 2.23: Variação da camada congelada em função da velocidade de injeção	23
Figura 2.24: Comparação entre uma máquina injectora eléctrica e hidráulica.....	24
Figura 2.25: Máquina injectora horizontal ENGEL Victory	25
Figura 2.26: Máquina injectora vertical ENGEL Insert	25
Figura 2.27: Máquina vertical ENGEL Insert com mesa rotativa (2 estações)	26
Figura 2.28: Fuso.....	27
Figura 2.29: Progressão do plástico fundido ao longo das zonas do fuso	28
Figura 2.30: Ilustração do fuso e bico de injeção	28
Figura 2.31: Contacto do bico de injeção (máquina injectora) com a bucha de injeção (molde) .	29
Figura 2.32: Anel de bloqueio fechado durante a injeção (à esquerda) e aberto durante a dosagem (à direita)	30
Figura 2.33: Áreas transversais dos cilindros.....	33
Figura 2.34: Exemplo da aspiração de material	34
Figura 2.35: Exemplo de um receptor de material e desumificador.....	35
Figura 2.36: Exemplo de termorregulador que controla a temperatura de água pressurizada a 140 °C	37
Figura 2.37: Esquema de ciclo de moldação	38
Figura 2.38: Esquema de ciclo de moldação exibido pelo painel de controlo da máquina injectora ENGEL.....	38
Figura 2.39: Fecho do molde.....	39
Figura 2.40: Encosto do bico de injeção.....	39
Figura 2.41: Injeção do polímero nas cavidades do molde.....	39
Figura 2.42: Compactação do material na cavidade do molde (pós-pressão)	40
Figura 2.43: Arrefecimento da peça	41
Figura 2.44: Dosagem e recuo do bico de injeção	41
Figura 2.45: Abertura do molde	41
Figura 2.46: Ilustração da abertura do molde	42
Figura 2.47: Extracção da peça	42

Figura 2.48: Exemplo de peça com e sem fase de pressurização	43
Figura 3.3: Especificações do molde.....	47
Figura 3.4: Exemplo de peça retirada do molde.....	47
Figura 3.5: Molde utilizado fechado	47
Figura 3.6: Molde utilizado aberto	47
Figura 3.7: Máquina injectora utilizada e painel de controlo da mesma.....	48
Figura 3.8: Material termoplástico utilizado	49
Figura 3.9: Peças retiradas da máquina injectora para o estudo da viscosidade	50
Figura 3.10: Gráfico viscosidade em função da velocidade de injeção.....	51
Figura 3.11: Peças do estudo de balanceamento das cavidades	52
Figura 3.12: Gráfico massa média das peças em função da taxa de enchimento	54
Figura 3.13: Peças retiradas do estudo da queda de pressão	55
Figura 3.14: Gráfico do perfil de queda de pressão	56
Figura 3.15: Gráfico da janela de processo	59
Figura 3.16: Gráfico massa das peças em função do tempo de pós-pressão para as duas cavidades	60
Figura 3.17: Representação esquemática de um processo	62
Figura 3.18: CCC com coordenadas dos pontos	65
Figura 3.19: Medição das dimensões no interior da peça (à esquerda) e <i>software</i> utilizado pela <i>CMM</i> (à direita).....	67
Figura 3.20: Balança de precisão utilizada.....	67
Figura 3.21: <i>Ball test</i>	69
Figura 3.22: Comparação do gráfico dado pela máquina do <i>Ball Test</i> (à esquerda) e o gráfico gerado pelo <i>Matlab</i> (à direita) pertencente à peça da quarta experiência (2º réplica) da cavidade 12.....	69
Figura 3.23: Representação da zona de rotura em ambas as cavidades	70
Figura 3.24: Molde modelado com vista para o lado da injeção.....	71
Figura 3.25: Molde modelado com vista para o lado da extracção	71

Figura 3.26: Molde modelado aberto com as peças injectadas no interior.....	72
Figura 3.27: Canais de alimentação modelados	72
Figura 3.28: Peça modelada	72
Figura 3.29: Localização dos pontos de injeção.....	73
Figura 3.30: Peças com canais de alimentação modelados	73
Figura 3.31: Canais como se encontram no molde (esquerda) e como devem estar no Moldex3D (direita).....	74
Figura 3.32: Linhas de centro modeladas dos canais de refrigeração	74
Figura 3.33: Conjunto dos elementos modelados.....	75
Figura 3.34: Peças com sistema de alimentação	76
Figura 3.35: Canais de alimentação com pormenor da entrada de material.....	76
Figura 3.36: Canais de refrigeração com indicação das entradas e saídas da água	77
Figura 3.37: Direcção da água à saída da bucha (em cascata)	77
Figura 3.38: Circulação da água numa das buchas do molde.....	78
Figura 3.39: Refrigeração em cascata no interior das buchas no Moldex3D	78
Figura 3.40: <i>Moldbase</i> no <i>Moldex3D</i>	79
Figura 4.1: Gráfico de injeção	83
Figura 4.2: Superfície de resposta de $KPC1 = f(t, P)$	85
Figura 4.3: Histograma de resíduos (KPC1)	85
Figura 4.4: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (KPC1)	85
Figura 4.5: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (KPC1)	85
Figura 4.6: Superfície de resposta de $QCI3 = f(t, P)$	86
Figura 4.7: Histograma de resíduos (QCI3)	87
Figura 4.8: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI3)	87
Figura 4.9: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI3)	87
Figura 4.10: Superfície de resposta de $QCI4 = f(t, P)$	88
Figura 4.11: Histograma de resíduos (QCI4)	88
Figura 4.12: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI4)	88

Figura 4.13: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI4)	88
Figura 4.14: Superfície de resposta de $QCI6 = f(t, P)$	89
Figura 4.15: Histograma de resíduos (QCI6)	89
Figura 4.16: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI6)	90
Figura 4.17: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI6)	90
Figura 4.18: Superfície de resposta de $QCI11 = f(t, P)$	91
Figura 4.19: Histograma de resíduos (QCI11)	91
Figura 4.20: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI11)	91
Figura 4.21: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI11)	91
Figura 4.22: Superfície de resposta de $QCI12 = f(t, P)$	92
Figura 4.23: Histograma de resíduos (QCI12)	92
Figura 4.24: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI12)	93
Figura 4.25: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI12)	93
Figura 4.26: Superfície de resposta de $m(QCI10) = f(t, P)$	94
Figura 4.27: Histograma de resíduos (QCI10)	94
Figura 4.28: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI10)	94
Figura 4.29: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI10)	94
Figura 4.30: Tempo de injeção	97
Figura 4.31: Localização das linhas de soldadura	97
Figura 4.32: Localização das bolsas de ar	98
Figura 4.33: Contribuição dos pontos de injeção	98
Figura 4.34: Pressão hidráulica	99
Figura 4.35: Distribuição da temperatura na fase de injeção	100
Figura 4.36: Pós-pressão necessária	101
Figura 4.37: Contração volumétrica	102
Figura 4.38: Distribuição de temperatura na fase de pós-pressão	102
Figura 4.39: Indicador de rechupes	103

Figura 4.40: Tensões de corte de fluxo	103
Figura 4.41: Gráfico pressão em função do tempo.....	104
Figura 4.42: Gráfico força de fecho em função do tempo.....	105
Figura 4.43: Gráficos massa das cavidades em função do tempo	106
Figura 4.44: Temperatura de refrigeração com e sem sistema de alimentação	107
Figura 4.45: Temperatura nos canais de refrigeração	107
Figura 4.46: Tempo de arrefecimento com e sem sistema de alimentação	108
Figura 4.47: Eficiência da refrigeração	109
Figura 4.48: Taxa de camada congelada	110
Figura 4.49: Peças com respectivo referencial	111
Figura 4.50: Empeno segundo a direcção X.....	111
Figura 4.51: Empeno segundo a direcção Y.....	111
Figura 4.52: Empeno segundo a direcção Z	112
Figura 4.53: Empeno total da peça.....	112

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Unidades de uma máquina injectora e respectivas funções.....	23
Tabela 2.2: Características das máquinas horizontais e verticais.....	25
Tabela 2.3: Factores com as variáveis que influenciam a pressão de injeção	31
Tabela 3.1: Teste de viscosidade.....	51
Tabela 3.2: Diferença entre cavidades para 25 e 50%	53
Tabela 3.3: Diferença entre cavidades para 75% e EOF.....	53
Tabela 3.4: Massa média das peças.....	53
Tabela 3.5: Dados do estudo da queda de pressão	55
Tabela 3.6: Valores da queda de pressão	56
Tabela 3.7: Dados e observações do estudo da janela de processo	58
Tabela 3.8: Dados do teste da solidificação dos pontos de injeção	60
Tabela 3.9: Atribuição dos valores das variáveis	66
Tabela 3.10: Planeamento DOE.....	66
Tabela 3.11: Elementos necessários à execução da simulação	70
Tabela 3.12: Condições de processamento.....	79
Tabela 4.1: Resultados dos 6 estudos.....	82
Tabela 4.2: Factores significativos para cada resposta.....	95

Os símbolos utilizados ao longo do trabalho são acompanhados dos respectivos significados. Contudo estes significados podem obter-se na lista abaixo apresentada no qual esta dividida em duas partes: Símbolos e siglas.

Símbolos

A_r	Área transversal do cilindro hidráulico
A_s	Área transversal do fuso
F_b	<i>Force at break</i>
F_{max}	<i>Maximum force</i>
k	Número de factores considerados para o Desenho de Experiências
n	Número de observações em cada experiência
P_H	Pressão hidráulica da bomba
P_I	Pressão específica de injeção
R^2	Valor de adequabilidade do modelo
S_b	<i>Strain at break</i>
s_i^2	Variância amostral da experiência i
$(S/N)_i$	Razão sinal-ruído
t_{arref}	Tempo de arrefecimento da peça
t_{ciclo}	Tempo de ciclo total
t_{extr}	Tempo de extracção da peça
t_{inj}	Tempo de injeção e pós-pressão
$t_{f,a,e}$	Tempo de fecho do molde, abertura do mesmo e extracção da peça
w	<i>Work at break</i>
x_i, x_j	Variáveis de controlo
\bar{Y}^2	Média amostral da experiência i
α	Pontos extremos no planeamento composto central do tipo circunscrito
$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$	Coeficientes do polinómio
ϵ	Erro do polinómio

Siglas

ANOVA	<i>Analysis of variance</i>
BoP	<i>Bill of Process</i>
C1	Curso do fuso
C3	Curso de comutação
C4/C2	Descompressão
CMM	<i>Coordinate-measuring machine</i>
CPx	Almofada
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EOF	<i>End of fill</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
IR	<i>Intensification Ratio</i>
PET	Politereftalato de Etileno
PHu	Pressão de comutação
PNs f	Pós-pressão final
PNs i	Pós-pressão inicial
PVs	Pico pressão de injeção
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
SSx	Curso total de dosagem
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product model data</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
VSx	Volume de dosagem
Z2x	Tempo de pós-pressão
Z4x	Tempo de arrefecimento
ZDx	Tempo de dosagem
ZSx	Tempo de injeção
ZUs	Tempo total de ciclo

Introdução, Objectivos e Estrutura

1.1 Introdução

A moldação por injeção é o processo mais importante usado na manufactura de produtos de plástico. Actualmente, mais de um terço de todos os materiais termoplásticos são feitos através deste processo, e mais de metade de todo o equipamento para polímeros processados é utilizado para injeção de plásticos. O processo é idealmente utilizado na manufactura de peças produzidas em massa com formas complexas que requerem dimensões precisas [1].

O conceito de injeção de plásticos foi adoptado da indústria de fundição de metais, que começou a desenvolver-se no início e meados dos anos 1800. Os plásticos não eram conhecidos pelas suas propriedades úteis nessa altura. Em 1869, John Hyatt desenvolveu um conceito para fazer bolas de bilhar a partir de nitrato de celulose, também conhecido como celulóide. A sua máquina consistia num cilindro aquecido por vapor para fundir o celulóide e um êmbolo hidráulico para injectar o plástico no molde. A evolução continuou e muitos inventores desenvolveram o seu próprio conceito de máquina de injeção e seus componentes. Ao longo dos anos, as máquinas de injeção evoluíram das suas operações manuais para operações automáticas com controlos eléctricos proporcionando um melhor controlo sobre o processo.

As máquinas de hoje tornaram-se altamente complexas e são capazes de moldar quase tudo o que um *designer* de produto deseje, desde micro moldação de peças usadas na indústria relojoeira até componentes utilizados na indústria automóvel. A última geração de máquinas pode ser conectada a qualquer computador do mundo via internet e monitorizado remotamente. Este facto facilita a rápida depuração e resolução de problemas das máquinas e moldações sem recurso a um engenheiro no local. Tal como os equipamentos, o controlo sobre o processo tornou-se mais complexo uma vez que as tolerâncias dimensionais das peças são cada vez mais rigorosas, o desperdício de material cada vez menos tolerado e os clientes muito mais exigentes. Assim, torna-se cada vez mais importante a investigação dos aspectos tecnológicos e fenomenológicos de todo o

processo através de experiências e pesquisas. Algumas destas experiências são realizadas através de técnicas de simulação por computador que contribuem para a minimização de eventuais problemas na fase de fabrico das peças [2].

1.2 Contextualização do trabalho na empresa Delphi

Actualmente são inúmeras as empresas que usam a tecnologia da injeção de plásticos e um exemplo dessas é a *Delphi Automotive Systems, SA*. Este trabalho foi realizado em parceria com esta empresa, localizada no Seixal, que utiliza a tecnologia da moldação por injeção para produção de componentes plásticos que são necessários à composição dos injectores e conectores montados na empresa. Esta empresa é líder mundial na indústria de componentes e foi criada pela empresa norte-americana *General Motors* como *Automotive Components Group*, sendo mais tarde renomeada para *Delphi Automotive Systems*. É líder global no mercado em que actua, sendo a maior fornecedora de produtos electrónicos e tecnológicos para o mercado automóvel. Presente em Portugal desde 1981, detém neste momento três fábricas, sendo uma delas a *Delphi Seixal*. Esta fábrica iniciou a sua actividade em 1990 e é especialista na produção de componentes electrónicos para as principais fábricas de motores. Ela é fornecedora de cerca de 30 clientes que se encontram distribuídos mundialmente por 81 locais diferentes e o seu portfólio dos produtos é constituído por: ignições, sensores e actuadores no qual a produção dos componentes plásticos destes componentes é realizada através do processo de injeção de plásticos. A visão da *Delphi* passa por garantir excelência nos vários produtos que oferece ao consumidor, assegurando a satisfação do mesmo através dos elevados níveis de qualidade que praticam. Esta empresa segue uma filosofia 6-Sigma, muito utilizada na indústria automóvel para o controlo dos processos de fabrico de modo a maximizar a segurança dos consumidores e a qualidade do produto final ao mesmo tempo que se minimiza o número de produtos não conformes, por milhão de unidades produzidas, o que obriga a utilização de ferramentas de controlo estatístico e de melhoramento contínuo [3].

1.2.1 Bobinas de ignição

Como já foi dito anteriormente a *Delphi Seixal* produz bobinas de ignição, sensores e actuadores sendo que, neste trabalho, o estudo vai ser centralizado especialmente nas bobinas de ignição, mais particularmente num dos principais componentes destas.

Para que a mistura de ar com combustível seja queimada no interior do cilindro de um motor de combustão interna de ignição por faísca, tal como o próprio nome indica, é necessário uma faísca para inflamar a mistura. A finalidade do sistema de ignição é gerar essa faísca nas velas para que o combustível seja inflamado, o que não é possível alcançar utilizando directamente a bateria que tem geralmente um potencial de 12 V, sendo necessário atingir um potencial na ordem

dos milhares de volts, ao qual as bobinas de ignição têm essa função. As bobinas de ignição estudadas são do tipo *pencil coil* (Figura 1.1) devido à sua forma se assemelhar a um lápis (*pencil*). Estas são fabricadas e montadas na empresa e são compostas essencialmente pelo primário, secundário e *case*. O primário (que contém um núcleo de ferro no interior) encontra-se inserido no interior do secundário, que por sua vez se encontra inserido na *case*, sendo esta o revestimento dos dois primeiros. Quando o primário é alimentado pela bateria do automóvel com um potencial de 12 V, a corrente e o potencial são máximos no primário e nulos no secundário. No momento do corte de corrente, o campo electromagnético provocado pela diferença de potencial de 12 V para 0 V no primário, induz uma corrente no secundário, que provoca um aumento de potencial até cerca de 40 000 V, com uma corrente muito reduzida (Figura 1.2). Esta corrente é posteriormente descarregada na vela do automóvel provocando a ignição. A resina epóxi, impregnada entre os fios das bobinas do primário e secundário, impede que a corrente faça curto-circuito entre espiras e garante desta forma que o potencial será máximo à saída. O potencial máximo depende da relação do número de espiras do primário e secundário, da qualidade do núcleo de ferro e do campo magnético [3], [4].



Figura 1.1: Bobina de ignição do tipo pencil coil da BMW

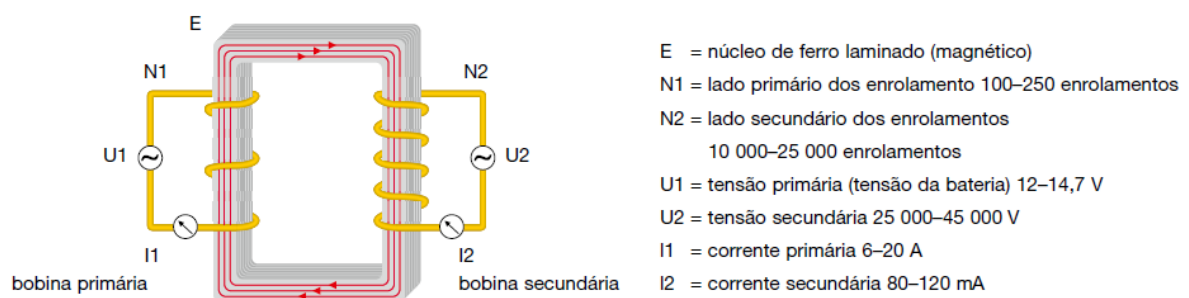


Figura 1.2: Representação esquemática do funcionamento electromagnético da bobina de ignição (adaptado de [4])

1.3 *Motivação e Objectivos*

Actualmente as indústrias deparam-se cada vez mais com padrões de elevada exigência vendo-se obrigadas a proporcionar produtos de qualidade. Na injeção de plásticos para atingir esse objectivo é necessário sistematizar e optimizar não só na criação dos moldes como também na definição das variáveis de controlo de todo o processo de injeção.

O processo de moldação actual tem sido tradicionalmente definido a partir dos parâmetros do processo, que correspondem aos *inputs* da máquina injectora. Estes são as definições de velocidades, pressões, temperaturas e tempos, nomeadamente as velocidades de injeção, pós-pressão, temperatura de fusão e tempo de arrefecimento, que seriam fixados na máquina e registados numa folha, chamada de folha de processo ou folha de *setup*. No entanto, a palavra processo precisa agora de ser redefinida como uma operação completa que engloba todas as actividades do plástico desde que este entra na tremonha em forma de granulado até a sua extracção como uma peça moldada. Naturalmente, a compreensão de cada etapa torna-se agora imperativa para obter um melhor controlo na qualidade da peça moldada. Moldar uma peça que se encontre dentro dos requisitos de qualidade não é o verdadeiro desafio mas sim moldar de forma consistente: de cavidade para cavidade, de injeção para injeção e de um ciclo de produção para outro encontrando-se dentro dos padrões da qualidade estabelecidos com o mínimo de esforço e com a máxima eficiência [2]. No processo de moldação por injeção destaca-se a fase de pressurização por ter uma maior influência nas propriedades finais do produto, no que diz respeito à sua massa e resistência ao impacto como também garantir as características dimensionais das peças. A utilização dos valores ideais nos parâmetros desta fase é então fundamental para a obtenção das características desejadas no produto injectado.

O objectivo principal deste trabalho é o estudo dos parâmetros de pressurização utilizados na injeção de componentes poliméricos para caracterização desta fase do processo. Enquanto objectivo tecnológico, este trabalho visa sobretudo a demonstração das metodologias utilizadas, nomeadamente a Metodologia de Resposta em Superfície e a simulação do processo de injeção através do *software Moldex3D*, enquanto facilitadoras da instalação de novos moldes nas máquinas injectoras.

Esta empresa, com o desenvolvimento do equipamento, processo e metodologias, sente necessidade em criar um novo método para validar os novos moldes e com isso melhorar o conhecimento para a utilização correcta de certas condições de processo tais como tempos de arrefecimento das peças, tempo total de ciclo do processo, condições de secagem (tempo, pressão, temperatura, caudal) e assim substituir as correcções reactivas pelas acções preventivas nas máquinas injectoras. Tendo em conta esta situação, pretende-se com este trabalho criar uma nova

folha de *setup* para as máquinas presentes na empresa com uma reformulação dos parâmetros das mesmas e a introdução de um método de validação dos moldes, a criação do *Bill of Process* de todo o processo que irá servir de suporte também à validação.

A Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology - RSM*) será utilizada para o estudo dos principais parâmetros do molde correspondente à peça utilizada na simulação. Os valores de controlo obtidos com este método estatístico serão então comparados com os valores validados pela empresa.

O trabalho visa também utilizar o *software Moldex 3D* como ferramenta de simulação do processo de moldação por injeção e estudar o comportamento de uma peça escolhida pela empresa. O *Moldex 3D* dispõe de ferramentas que permitem prever e eliminar potenciais problemas de produção e de optimização do projecto da peça e do molde, ao mesmo tempo que possibilita realizar experiências de forma a observar-se o comportamento dos diversos parâmetros do processo, permitindo assim adquirir-se destreza na manipulação das principais variáveis envolvidas em todo o processo de moldação por injeção.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco partes: ***Introdução, Estado da Arte, Procedimento experimental, Resultados e Conclusões***, com os conteúdos a seguir indicados:

Introdução – Esta primeira parte consiste no Capítulo 1. Neste capítulo contextualiza-se o tema, é feita uma pequena apresentação da empresa que produz o componente a estudar nesta dissertação e apresenta-se a motivação que conduziu a este trabalho. Procede-se ainda à definição dos objectivos a atingir na conclusão desta dissertação e apresenta-se a estrutura do documento.

Estado da Arte – Consiste no Capítulo 2 onde é apresentado o resultado da pesquisa bibliográfica realizada. São apresentados os fundamentos teóricos para uma melhor compreensão do tema, abordando-se o estado da arte que incide sobre as matérias relevantes para esta dissertação. O Estado da Arte divide-se nos aspectos fundamentais pela seguinte ordem: Moldes, Polímeros, Máquina injectora, Receptores de material, Desumificadores, Controladores de temperatura e Ciclo de moldação por injeção.

Procedimento Experimental – O capítulo 3 consiste na apresentação das Metodologias e Procedimento Experimental. É explicada a construção tanto do *Bill of Process* (BoP) como das novas folhas de *Setup*, é feita uma descrição do equipamento utilizado na componente experimental e é apresentado todo o procedimento experimental nomeadamente a

preparação do molde, a aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) a partir do Desenho de Experiências (DOE) e as simulações do processo.

Resultados – Em seguida, no Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados da preparação do molde, da Metodologia de Superfície de Resposta e das simulações.

Conclusões – Finalmente, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e as sugestões para desenvolvimentos futuros.

Revisão do Estado da Arte

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos da moldação por injeção para uma melhor compreensão do assunto abordado nesta dissertação, dando a conhecer o equipamento utilizado por esta tecnologia, a matéria-prima e o conjunto de fases que constituem o processo da injeção de plásticos.

2.1 Moldes

O molde de injeção é hoje o mais usado no processamento de polímeros e é um sistema complexo que deve cumprir simultaneamente diversos requisitos impostos pelo processo de injeção por moldação. Existem 3 funções principais do molde. A primeira função é a contenção do plástico no interior das cavidades do molde para que estas possam ser completamente preenchidas e formar um componente cuja forma replica a cavidade do molde. A segunda função do molde é a transferência de calor de forma eficiente do polímero fundido para o aço das superfícies do molde para que os produtos moldados possam ser produzidos tão uniformemente e economicamente possível. A terceira função é a extracção da peça do molde de uma forma rápida mas repetida, para que as moldações seguintes possam ser produzidas de forma eficiente. Estas 3 funções principais (conter o material, transferir o calor e extrair a peça moldada) também representam requisitos secundários na injeção por moldação. Por exemplo, na função de conter o material fundido nas cavidades do molde requer que o molde resista às forças elevadas que vão tender a abrir o molde e que o molde contenha um sistema de alimentação conectando o bico de injeção a uma ou mais cavidades para transferir o polímero fundido [5]. O molde de injeção é tipicamente a parte mais precisa no sistema de moldação e é importante referir que devido a alguma precisão ser perdida em qualquer processo de replicação, a precisão do molde tem de ser melhor que qualquer especificação das peças a serem moldadas. O desafio em construir um molde preciso é que os moldes são constituídos por vários componentes ligados entre si, então a precisão das peças é muitas vezes determinada mais pela maneira de como esses componentes se interligam do que propriamente da precisão dos componentes individualmente [6].

Um molde de injeção pode ser entendido então como uma estrutura onde se encontram um conjunto de sistemas funcionais que permitem que um espaço em que a peça vai ser moldada, definido pela cavidade, seja preenchido com o plástico fundido em condições controladas, pelos outros sistemas que garantem a qualidade dimensional e estrutural das peças produzidas. Estes sistemas funcionais são [7]:

- Sistema de alimentação;
- Sistema de alinhamento;
- Sistema de escape de gases;
- Sistema de refrigeração;
- Sistema de extracção;
- Zonas moldantes (cavidades).

2.1.1 Tipos de moldes

Por sua vez o molde é o sistema funcional da máquina de injeção directamente associado a um produto. Dependendo das peças a produzir, pode ser mais ou menos complicado. Os moldes utilizados podem ser agrupados em três tipos principais:

- Moldes de duas placas/convencionais;
- Moldes de três placas;
- Moldes de canais quentes.

Os moldes dos dois últimos tipos permitem obter peças já separadas do sistema de alimentação. Um exemplo de cada um dos 3 tipos pode ser observado na Figura 2.1, Figura 2.2 e Figura 2.3. Nos moldes convencionais (de duas placas) e nos de três placas é necessário fazer-se a reciclagem do material do sistema de alimentação mas, nos moldes de canais quentes, tal operação é desnecessária devido ao sistema de alimentação permanecer sempre dentro do molde. Um exemplo desta reciclagem pode ser vista na Figura 2.4 onde está representada uma máquina injectora horizontal em que as peças e os canais de alimentação caem por gravidade nos respectivos compartimentos sendo os últimos posteriormente levados para a reciclagem por um operador.

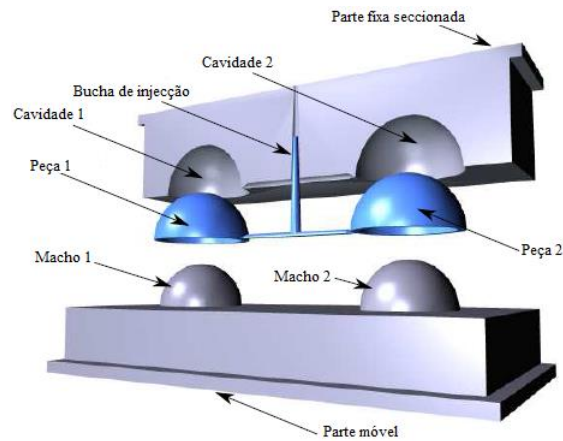


Figura 2.1: Molde de 2 placas/convencional (adaptado de [8])

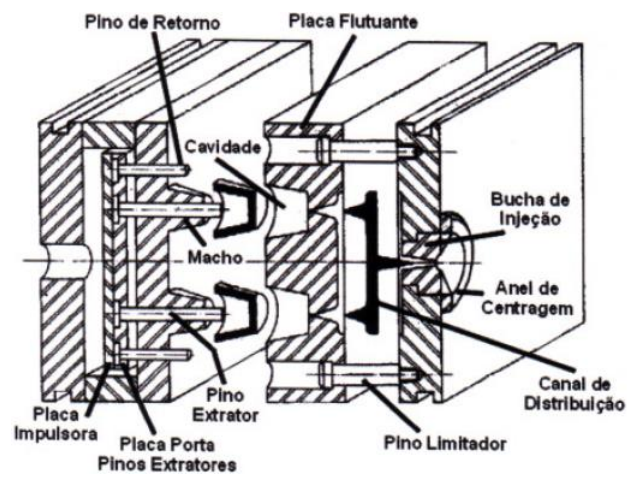


Figura 2.2: Molde de 3 placas (adaptado de [9])

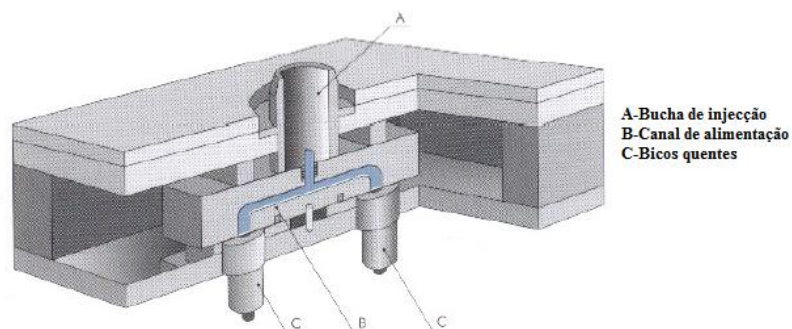


Figura 2.3: Molde de canais quentes (adaptado de [7])

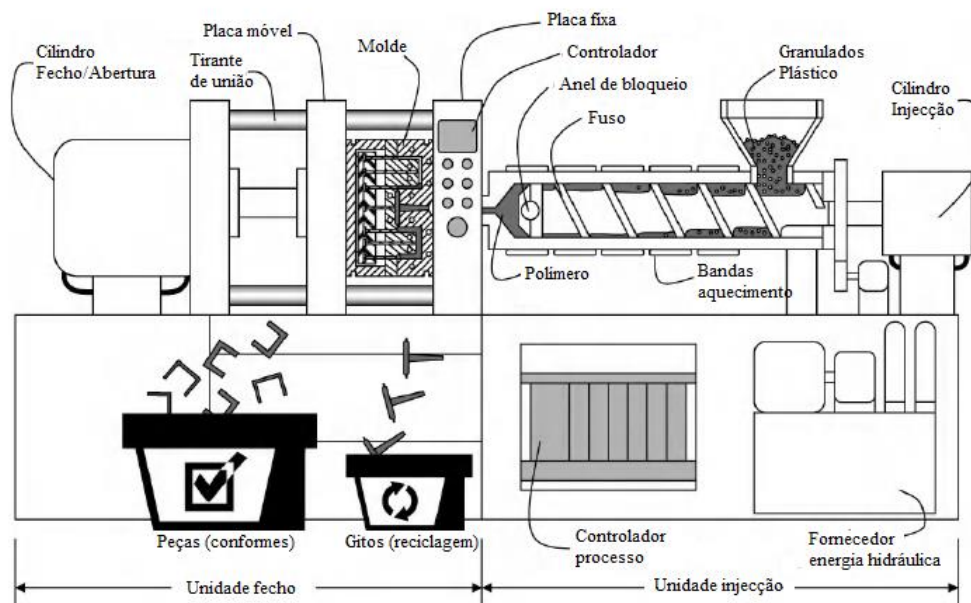


Figura 2.4: Ilustração de uma Máquina Injectora (adaptado de [5])

2.1.2 A forma da cavidade

A forma da cavidade é essencialmente o negativo da forma desejada para a peça a moldar, com as devidas tolerâncias dimensionais que permitem o fenómeno da contracção do plástico. A cavidade pode ser directamente maquinada nas superfícies do molde ou formada inserindo postigos das cavidades. Os postigos são elementos que contêm as cavidades ou formam os machos tendo as vantagens de reduzirem o custo de produção do molde, receberem um tratamento térmico diferente do molde sem provocar deformações na estrutura deste e ainda de serem facilmente substituídos em caso de manutenção, avaria ou alteração da peça. Habitualmente, as cavidades estão localizadas na metade do molde que é montada no lado da injeção devido a facilitar a extracção da peça, sistema esse que se encontra na outra metade do molde. Na Figura 2.5 e Figura 2.6 estão representados um molde com a forma de uma cavidade e um postigo [10].

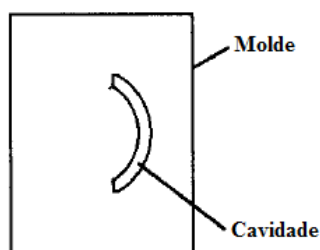


Figura 2.5: Ilustração de um molde básico com uma cavidade (adaptado de [10])

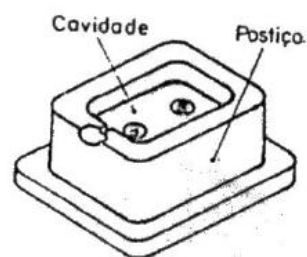


Figura 2.6: Placa Suporte com postigo (adaptado de [9])

2.1.3 Número de cavidades do Molde

Muitos moldes, particularmente moldes para produtos de elevadas dimensões, são construídos com apenas uma cavidade mas para a maioria dos moldes, especialmente moldes para alta produção, são construídos com duas ou mais cavidades. Apenas leva um pouco mais de tempo a injectar para várias cavidades do que para apenas uma. Um molde com mais cavidades tem um custo mais elevado de construção do que um molde com apenas uma e requer uma máquina de maiores dimensões, maior capacidade e poderá precisar de uma maior unidade de injeção pois a quantidade de plástico a injectar se for mais cavidades é maior. Os moldes de multicavidade são hoje construídos com um número preferível de cavidades: 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128. Estes números são seleccionados porque as cavidades podem ser facilmente distribuídas num padrão rectangular, o que facilita o projecto e dimensionamento para construção e para a simetria em torno do centro da máquina, o que é altamente desejado para assegurar uma força de fecho semelhante em cada cavidade. Na Figura 2.7 está representado um molde com 2 cavidades, produzindo portanto 2 peças por cada ciclo [10].

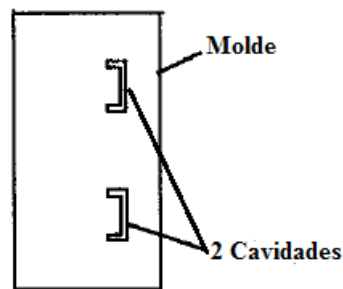


Figura 2.7: Ilustração de um molde básico com 2 cavidades (adaptado de [10])

2.1.4 Linha de separação

Na Figura 2.8 é mostrado o espaço da cavidade no interior de um molde. Para produzir um molde e remover as peças moldadas é necessário que o molde tenha pelo menos duas partes separadas, uma com a cavidade e outra com o macho. A separação entre as partes do molde é chamada linha de separação. Na verdade, é uma área de partição ou um plano, mas por convenção, neste contexto é referido como uma linha. Numa vista de perfil, esta área é realmente vista como uma linha e pode tomar qualquer forma mas para facilitar a construção do molde é preferível que esteja no mesmo plano. A linha de separação é sempre a circunferência de maior diâmetro do produto para que a extracção da peça a partir do molde seja possível [10].

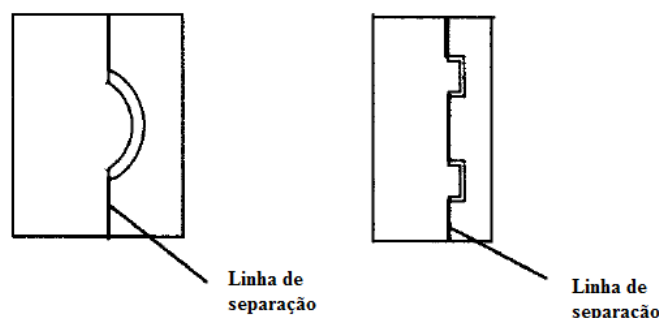


Figura 2.8: Ilustração de um molde básico mostrando a linha de separação (adaptado de [10])

2.1.5 Sistema de alimentação

Para levar o plástico para as cavidades do molde é necessário que seja feito com pressão suficiente para que as cavidades fiquem totalmente preenchidas antes que o plástico solidifique, isto é, arrefecer de uma maneira que o plástico não consiga fluir mais. As passagens do plástico são: na bucha de injeção (*sprue*), por onde o bico do fuso contacta o molde, os canais de alimentação/distribuição (*runners*), que distribuem o plástico para as respectivas cavidades e os pontos de injeção (*gates*), que são normalmente pequenos orifícios que ligam os canais de alimentação às cavidades do molde. Estes elementos estão representados na Figura 2.9 e Figura 2.10. Em peças de grandes dimensões é frequente o enchimento da cavidade através de vários pontos de injeção. A bucha de injeção é um canal de tronco cónico divergente sendo esta forma necessária para facilitar a sua extracção e pode ser maquinado directamente no molde ou utilizar um acessório alternativo que desempenha a mesma função. Os canais de alimentação devem ter preferencialmente secção circular, com diâmetro da ordem de 9 mm para os alimentadores principais e 6 a 7.5 mm para os secundários mas a secção transversal pode ser ainda semicircular, trapezoidal, rectangular e com forma de U. Um exemplo da secção transversal destes canais pode ser observada na Figura 2.11. Os moldes podem ter ainda dois tipos de sistema de canais podendo estes ser frios ou quentes [10].

⇒ Sistema de canais frios

Com materiais termoplásticos, um molde de canais frios refere-se a um molde ao qual o canal é arrefecido, solidificado e ejectado com a peça moldada durante cada ciclo de moldação.

⇒ Sistema de canais quentes

No sistema de canais quentes os canais não são ejectados com a peça permanecendo no molde com uma temperatura que mantém o polímero acima da sua temperatura de fusão e é injectado na cavidade no ciclo seguinte. Apesar deste sistema ter custos mais elevados tem a

vantagem de poder utilizar uma pressão de injeção mais baixa e não haver a preocupação de separar as peças dos canais [11].

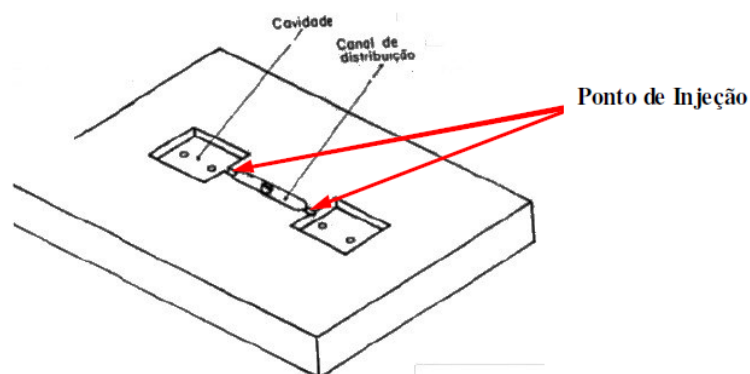


Figura 2.9: Ilustração de placa de suporte com pontos de injeção (adaptado de [9])

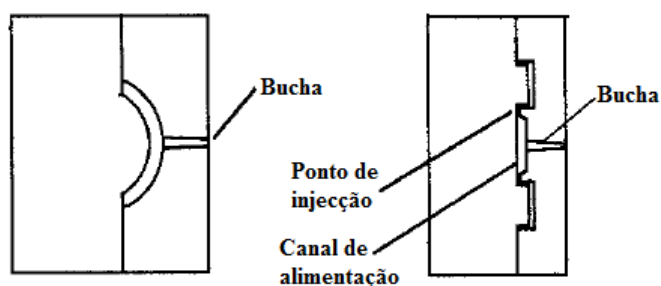


Figura 2.10: Ilustração do sistema de alimentação de dois moldes básicos (adaptado de [10])



Figura 2.11: Tipos de secções transversais dos canais de alimentação (adaptado de [7])

2.1.6 Ventilação do molde

Quando o plástico flui do ponto de injeção para a cavidade, o ar que lá se encontra quando o molde fecha tem de ter uma via de escape. Tipicamente, o ar preso é empurrado rapidamente pelo plástico quando este é injectado em direcção às zonas mais afastadas do ponto de injeção. Quanto mais elevada for a velocidade de injeção, o que normalmente é o desejado, maior quantidade de ar é comprimido se este não for permitido a escapar ou ventilar. A temperatura do ar eleva-se até a um ponto a que o plástico em contacto com este irá sobreaquecer e possivelmente ficará danificado.

Mesmo que o ar não fique quente o suficiente para queimar o plástico, ele pode prejudicar o preenchimento total da cavidade ficando preso em pequenos cantos. Outro problema que pode surgir é quando o plástico fundido proveniente de duas ou mais direções entra em contacto e contenha ar entre eles. A não ser que exista ventilação nessa zona as duas frentes de plástico não irão unir e poderá levar a um rechupe na superfície da peça, estando um exemplo deste representado na Figura 2.12. Esse caso poderá surgir quando existem mais de um ponto de injeção para uma mesma cavidade ou no caso do plástico se dividir em dois depois de sair do ponto de injeção devido à forma do produto ou localização do ponto de injeção. A maioria das cavidades pode ser ventilada na linha de separação mas frequentemente são necessárias aberturas adicionais. No interior da cavidade o plástico flui sempre na direção que oferece menor resistência, ou seja, se houver áreas de menor espessura, ele só irá preenche-las só depois das secções mais espessas estarem preenchidas [10].

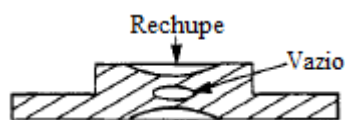


Figura 2.12: Defeitos numa peça [10]

2.1.7 Arrefecimento

Na moldação por injeção, o plástico é aquecido na máquina injectora até à sua temperatura de fusão transferindo energia em forma de calor. Depois de injectado, o plástico necessita de ser arrefecido, em outras palavras, aquela energia em forma de calor tem de ser removida por arrefecimento para que a peça moldada se torne rígida. O arrefecimento pode ser realizado de forma natural, deixando o calor ser dissipado para as paredes do molde e por sua vez para o ambiente. Isto não é recomendável para uma alta produção de peças. O arrefecimento não é apenas para o plástico mas também para as superfícies do molde que entram em contacto com este e que também aquecem. O arrefecimento é assegurado, normalmente por água circulante em canais (linhas de água) distribuídos regularmente na bucha e na cavidade e acompanhando tanto quanto possível a sua forma. Para o caso de materiais de engenharia, moldados a temperaturas mais elevadas, como o policarbonato, o fluido de arrefecimento, funcionando acima de 100°C, é um óleo. Para que o controlo de temperatura do molde seja eficiente este fluido deve ser mantido a uma temperatura constante, usando-se, para o efeito termorreguladores (para as temperaturas acima de 40-50°C) ou refrigeradores para temperaturas abaixo da ambiente [10].

Os canais de refrigeração na moldação por injeção podem ser em série ou paralelo. Um circuito em paralelo é alimentado por vários circuitos paralelo de água provenientes de uma ou mais fontes. Um caso ideal é quando a água é distribuída uniformemente em todos os circuitos com

a mesma temperatura e taxa de fluxo. Os circuitos em série não contêm qualquer sub-circuito e possuem uma única entrada e saída. Um circuito em série, que pode conseguir uma transferência de calor e um fluxo do fluido de refrigeração uniformes, é normalmente preferível a um circuito paralelo. Se for necessário utilizar um circuito em paralelo, cada ramo deve ser equilibrado para a carga local de calor. Os circuitos paralelos mal desenhados podem ter ramos onde exista pouco ou nenhum fluxo. O fluxo de cada ramo deve ser controlado de modo a que em cada um desses o fluido de refrigeração do circuito de arrefecimento seja máximo. Devido às características de projecção dos canais em paralelo, a taxa de fluxo ao longo de vários canais de refrigeração será diferente devido às diferentes resistências ao fluxo de cada um dos canais. Estas variações da taxa de fluxo fazem com que a eficiência da transferência de calor dos canais varie de uns para outros. Como consequência, a refrigeração do molde não será uniforme neste tipo de configuração dos canais [12], [13]. Na Figura 2.13 pode estão representados estes dois tipos.

Existem soluções alternativas como o deflector (*baffle*), a cascata (*bubbler*) e pino térmico (*thermal pin*) (Figura 2.15). Estes métodos são utilizados em regiões do molde onde se deseja uma refrigeração mais eficiente que não seja possível com os canais tradicionais. O deflector é basicamente um canal de refrigeração inserido perpendicularmente a um canal principal que desvia o fluxo para que uma determinada zona mais estreita seja arrefecida e retorna depois novamente ao canal principal. A cascata permite levar a refrigeração a zonas que tal como no caso do deflector, haja falta de espaço mas também no caso de não permitir criar um canal de retorno. O fluido passa por um único tubo e ao chegar ao topo deste é expelido como uma fonte retornando ao canal principal pela parte exterior do tubo. O pino térmico é um cilindro selado com um fluido que vaporiza quando em contacto com o calor proveniente do aço do molde e condensa quando transfere esse calor para o canal principal de refrigeração [12], [14].

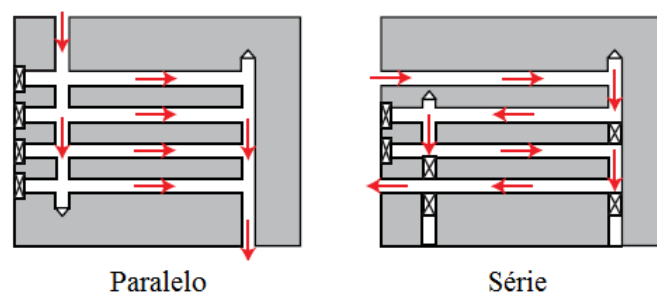


Figura 2.13: Configurações dos canais de refrigeração (adaptado de [12])

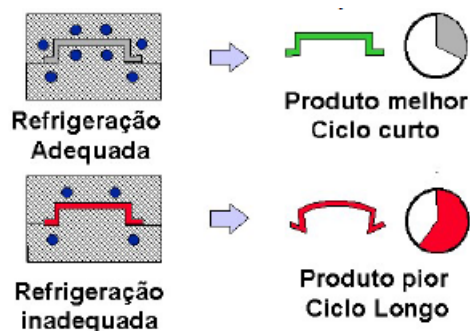


Figura 2.14: Refrigeração num molde de injeção (adaptado de [9])

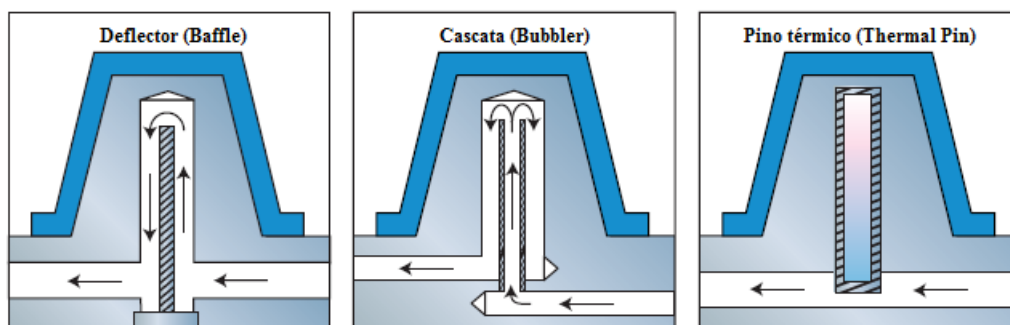


Figura 2.15: Tipos de refrigeração nos machos (adaptado de [12])

2.1.8 Extração

Depois do plástico na cavidade ser suficientemente rígido para ser extraído sem que sofra qualquer tipo de deformação e seja capaz de assegurar a sua estabilidade dimensional, as partes do molde abrem, permitindo o espaço necessário para a remoção da peça. Na Figura 2.16 e Figura 2.17 estão representadas a extração de uma peça com sistema de alimentação de canais frios num molde convencional (de duas placas) e num de três, respectivamente [10].

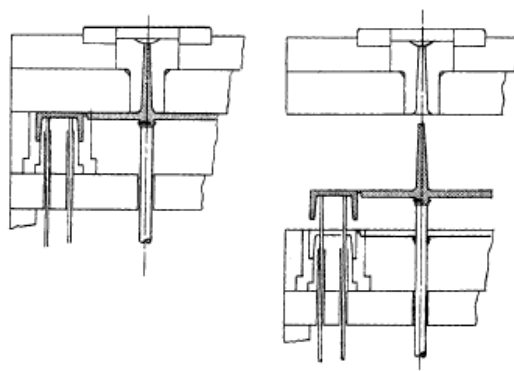


Figura 2.16: Exemplo de um sistema de extração utilizado num molde convencional [15]

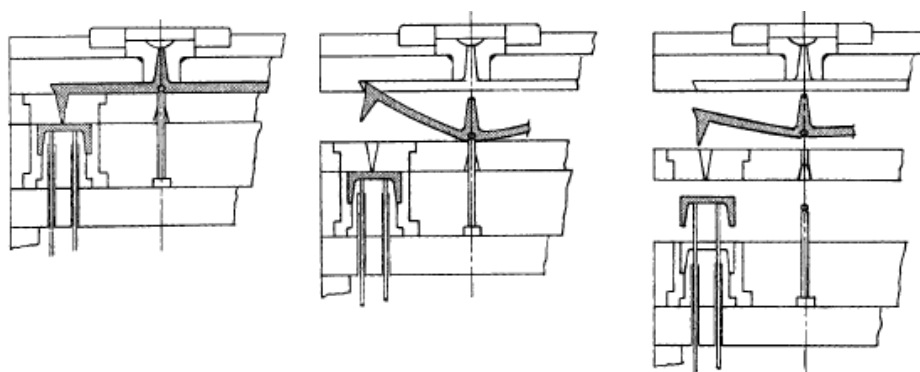


Figura 2.17: Exemplo de um sistema de extracção utilizado num molde de 3 placas (adaptado de [15])

2.2 Polímeros

A palavra “plástico” é utilizada habitualmente quando se refere materiais de moldação por injeção. Os plásticos são uma classe de moléculas de cadeia longa chamados de polímeros. A palavra polímero (do inglês *Polymer*), significa muitas (*Poly*) partes (*mer*). Um polímero é então muitas partes quimicamente unidas. Os polímeros podem ser divididos tendo em conta as suas características mecânicas, podendo ser classificados como termoplásticos, termoendurecíveis ou elastómeros. Os termoplásticos são o tipo de polímero mais encontrado no mercado e será este que será abordado nesta dissertação. Estes polímeros podem ser fundidos diversas vezes logo a sua reciclagem é possível, característica bastante desejável actualmente. O mesmo já não acontece com os polímeros termoendurecíveis visto que uma vez transformados (moldados), não se fundem mais tendo como características a alta dureza e comportamento frágil, porém bastante resistentes, sendo muito estáveis a variações de temperatura. Já os elastómeros não fundem complicando a sua reciclagem, mas apresentam alta elasticidade, não sendo rígidos como o caso anterior [2].

2.2.1 Propriedades

Os materiais plásticos são habitualmente utilizados em todas as áreas da indústria. A principal razão são as suas propriedades, entre outras, a leveza, a resistência à corrosão e a facilidade em tomar forma. Os plásticos têm ainda as seguintes características:

- Baixa difusidade térmica: os plásticos são intrinsecamente maus condutores de calor, dificultando as trocas térmicas necessárias à sua transformação. Por isso, na moldação por injeção deve-se minimizar a espessura das peças a moldar.
- Comportamento reológico: os termoplásticos, quando no estado fundido, apresentam-se sob a forma de fluidos de elevada viscosidade e com comportamento viscoelástico. A sua viscosidade é função da taxa de deformação imposta pelo material, podendo ser

relativamente baixa para velocidades de deformação elevadas. Por isso, o preenchimento de cavidades tende a ser efectuado com velocidades de injeção elevadas.

- Elevada dependência térmica da densidade: o modo de organização das cadeias moleculares constituintes de um sistema polimérico é altamente dependente da temperatura. De facto, um aumento da temperatura provoca o crescimento do volume livre intermolecular e a consequente expansão do material. Do ponto de vista prático, este efeito traduz-se em valores elevados do coeficiente de dilatação linear (cerca de 5 a 6 vezes superiores ao do aço para termoplásticos não reforçados) e na existência do fenómeno da contracção, associado ao arrefecimento de peças injectadas.

2.2.2 Morfologia dos Polímeros (*Polímeros amorfos e cristalinos*)

A morfologia dos polímeros é o tipo de arranjo das moléculas numa amostra. Baseado nas diferentes maneiras que as moléculas podem estar posicionadas, existem dois tipos de polímeros: amorfos e cristalinos. Nos polímeros amorfos, as moléculas estão posicionadas aleatoriamente sem qualquer estrutura ou arranjo. No caso dos polímeros cristalinos existem certas regiões na amostra onde as moléculas estão posicionadas de uma forma muito ordenada e estruturada. Cada uma destas regiões é chamada de cristalite (Figura 2.18). Não existe nenhum polímero 100% cristalino pois existe sempre áreas onde as moléculas estão posicionadas de forma aleatória. Isto é uma vantagem na fabricação de produtos de plástico porque a cristalinidade torna um material tenaz mas também o torna frágil e um polímero completamente cristalino iria ser demasiado quebradiço para ser usado como plástico. As regiões amorfas conferem ductilidade aos polímeros, isto é, a capacidade de dobrar sem partir (resistência a deformações permanentes) [2].

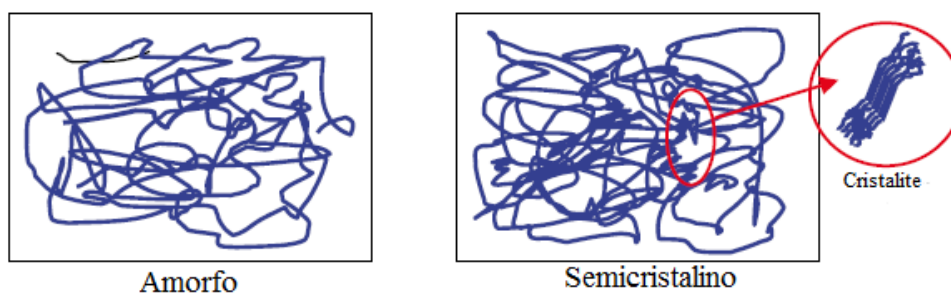


Figura 2.18: Arranjo das moléculas em polímeros amorfos e semicristalinos (adaptado de [2])

2.2.3 Papel da morfologia na moldação por injeção

As características de moldação de polímeros cristalinos e amorfos são diferentes. As cristalites são formadas a partir devido à elevada atracção molecular e pela possibilidade das cadeias serem desimpedidas para formar a ligação. Para o processamento por fundição, as

cristalites têm de ser dissolvidas e as cadeias separadas umas das outras, para baixar a viscosidade e injectar o fundido para o interior do molde [2].

2.2.4 Diferenças na contracção entre materiais amorfos e cristalinos

Contracção é a alteração volumétrica entre a fase de fusão do material e a transição vítrea. Com o aumento de temperatura, as moléculas ganham energia, tornam-se móveis e afastam-se umas das outras, resultando num aumento de volume do polímero. Quando o polímero arrefece, o oposto acontece e o seu volume diminui, sendo este fenómeno chamado de contracção. Nos polímeros cristalinos, o movimento entre moléculas é muito maior que nos polímeros amorfos. Quando as moléculas arrefecem, elas recuam para formar uma matriz altamente estruturada e compactada, o que é outra razão que contribui para a sua elevada contracção. A ausência de tal estrutura em polímeros amorfos nega a necessidade das moléculas procurarem um local definitivo para se situarem durante o processo de arrefecimento, resultando num valor de contracção baixo comparado com o caso dos plásticos cristalinos. No gráfico abaixo de volume específico em função da temperatura (Figura 2.19) é possível observar o comportamento cristalino, amorfo e semicristalino dos materiais ao longo das diferentes fases do processo.

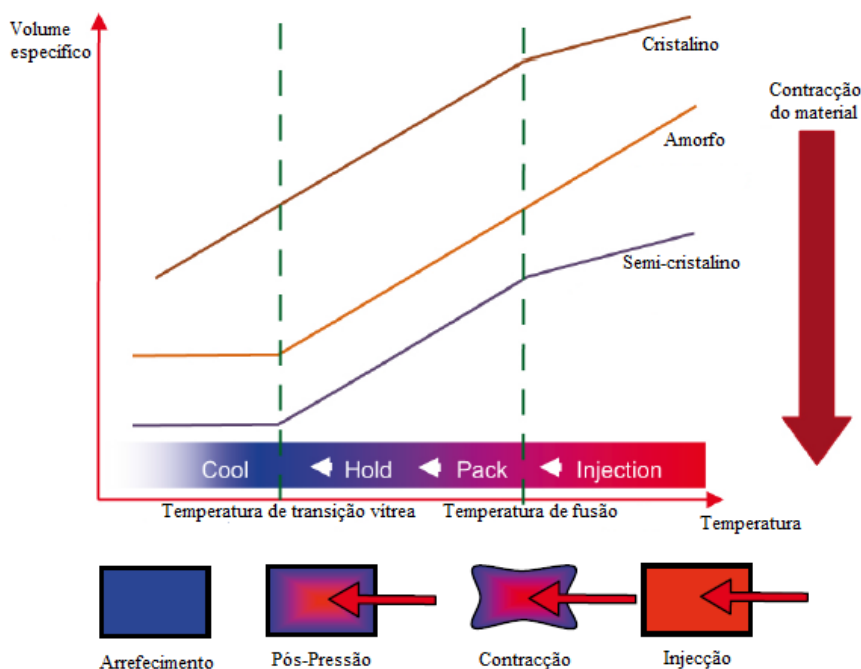


Figura 2.19: Efeito da temperatura no volume específico nas diferentes fases do processo de injeção
(adaptado de [2])

2.2.5 Contração e Empeno nas peças

A contração das peças plásticas moldadas é governada principalmente pela contração térmica do plástico, pela compressibilidade do plástico na fase da pós-pressão e pela expansão térmica do metal do molde que corresponde a uma extensão muito pequena. Apesar desta pequena mudança nas dimensões do molde comparada com a magnitude da contração do plástico, deve ser tido em conta quando são especificadas as dimensões finais das cavidades do molde para que seja possível atingir tolerâncias dimensionais apertadas no produto final.

Os efeitos que as várias condições de processo críticas têm na contração do material são mostradas na Figura 2.20. As variáveis principais relacionam-se com a pressão e temperatura do plástico fundido na cavidade do molde. O tempo de pós-pressão e de arrefecimento têm pouco efeito na contração quando são utilizados tempos suficientes. A temperatura de arrefecimento tem um efeito ligeiramente maior que a temperatura do cilindro porque controla mais directamente a temperatura da moldação antes da extracção da peça [5].

As alterações dimensionais na contração ocorrem no mesmo plano. Quando as peças distorcem e dobram fora de um plano então está a ocorrer empeno na peça. O empeno pode vir a provocar maiores alterações dimensionais que a contração e é mais difícil de prever e corrigir que esta. A causa mais comum de empeno é a existência de um gradiente de temperatura ao longo da espessura da peça. Outra causa são os gradientes de pressão e/ou temperatura através da área da peça. Um exemplo típico pode ser visto na Figura 2.21. Neste caso, a pressão na cavidade sobre o material fundido pode ser muito mais elevada perto do ponto de injeção que nas extremidades da cavidade do molde. Assim sendo, a contração linear e volumétrica no centro da peça será menor que a contração nas extremidades desta e se a diferença de contração for grande o suficiente então a peça irá sofrer empeno. Existem várias estratégias que devem ser utilizadas para evitar o empeno. A mais importante é projectar o molde que permita pressões e temperaturas uniformes do material na cavidade do molde, para que a contração da peça seja extremamente uniforme. Para maximizar a uniformidade da contração em aplicações com tolerâncias dimensionais apertadas, o projectista do molde deve:

- Evitar comprimentos de fluxo elevados em espessuras reduzidas, utilizando então vários pontos de injeção;
- Manter as pressões nas cavidades uniformes, projectando um sistema de alimentação equilibrado com pouca resistência ao fluxo;
- Maximizar a uniformidade da temperatura de superfície do molde com canais de arrefecimento bem projectados;

- Facilitar a uniformidade da pressão e temperatura do material fundido na moldação requerendo espessuras de peça o mais uniformes possível.

Se o molde estiver bem projectado e ainda assim ocorrer empeno, existem várias medidas de correcção tais como:

- Preencher as cavidades do molde o mais rápido possível para reduzir a camada congelada;
- Aumentar o tempo de pós-pressão até que a massa da peça não sofra alterações;
- Aumentar a pressão na cavidade para reduzir a contracção do material;
- Utilizar temperaturas de arrefecimento em diferentes zonas do molde para propositadamente controlar a temperatura e a distribuição da contracção da peça [5].

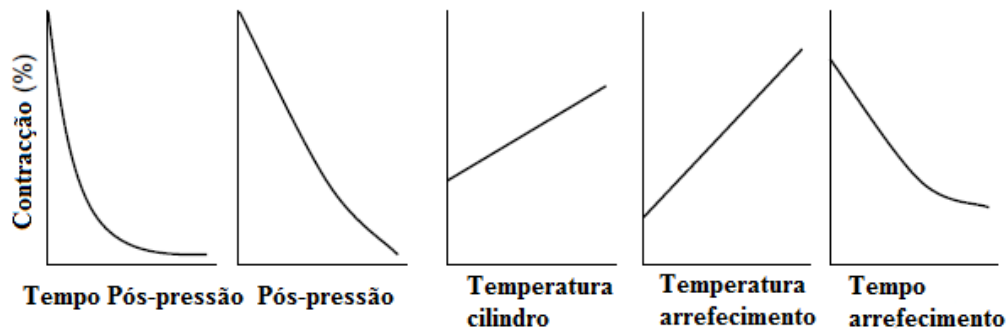


Figura 2.20: Efeito de variáveis de processo na contracção volumétrica (adaptado de [5])

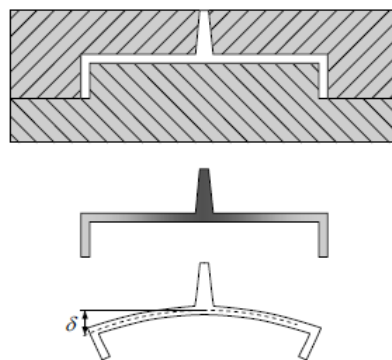


Figura 2.21: Empeno numa peça [5]

2.2.6 Intervalo de processamento do fundido

Uma cristalite necessita de uma quantidade específica de energia para fundir. Isto é chamado o ponto de fusão cristalino e a uma determinada temperatura a cristalite funde. Nos plásticos cristalinos, a fusão do material ocorre num intervalo bastante estreito de temperatura. A temperatura não é assim tão específica e precisa como no caso de moléculas simples devido à presença de regiões amorfas e outras forças de atracção. Quanto mais baixa a percentagem de cristalinidade, mais ampla é a gama de processamento. Esta diferença no intervalo de processamento de materiais cristalinos e amorfos é representada no gráfico da Figura 2.22 [2].

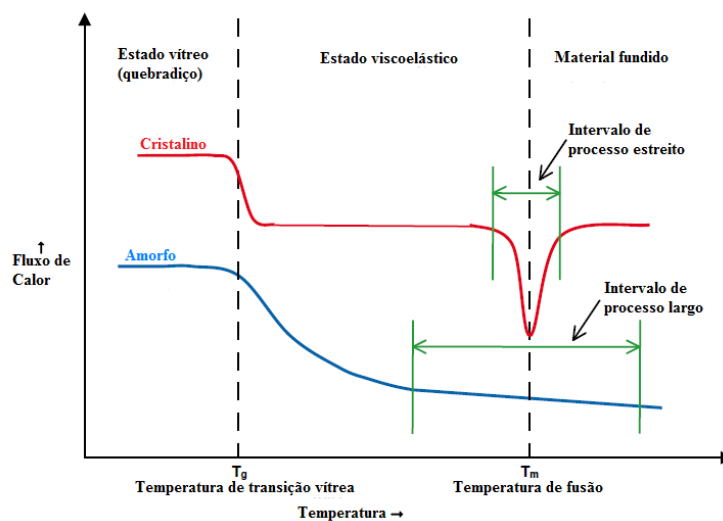


Figura 2.22: Transições térmicas e gamas de processamento para polímeros amorfos e semicristalinos (adaptado de [2])

2.2.7 Velocidade de enchimento do molde

A viscosidade do plástico e a temperatura de fusão são inversamente proporcionais. Quando a temperatura do plástico aumenta, a viscosidade diminui. À medida que o plástico flui através do molde frio, a temperatura do plástico diminui e a viscosidade aumenta. Uma vez que para plásticos cristalinos, a gama de processamento é estreita, a temperatura da frente de fluxo deve ser sempre maior do que o mínimo requerido de temperatura de fusão. No caso dos plásticos amorfos, como o plástico permanece viscoso através de uma gama mais ampla de temperaturas, velocidades de injeção lenta são permitidas, desde que a frente de fluxo se mantenha acima da temperatura mínima de processamento. Isto é típico na moldação de lentes ópticas. Um fenómeno que varia com a velocidade de injeção e a temperatura do molde é denominada camada congelada ou camada de material frio. Esta camada é formada no primeiro contacto entre a frente de enchimento e as paredes do molde e é tanto mais espessa quanto menor for a velocidade de

injecção, que proporciona mais tempo para o material arrefecer e solidificar. Este fenómeno encontra-se representado na Figura 2.23 [2].

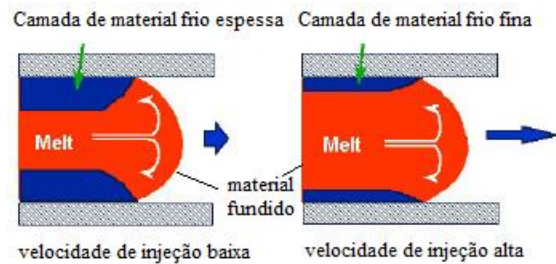


Figura 2.23: Variação da camada congelada em função da velocidade de injeção (adaptado de [9])

2.3 Máquina injectora

A máquina injectora é o equipamento utilizado para a fabricação de produtos moldados, fundindo o plástico granulado para que este possa ser injectado no molde, que contém uma ou mais cavidades, e assim tomar a forma do produto pretendido. A máquina injectora consiste, essencialmente, na unidade de fecho, unidade de injeção, unidade de potência e unidade de controlo. Na Tabela 2.1 é possível conferir as funções de cada uma dessas unidades.

Tabela 2.1: Unidades de uma máquina injectora e respectivas funções (adaptado de [7])

<i>Unidade</i>	<i>Funções</i>
Fecho	<ul style="list-style-type: none"> -Fechar e travar o molde rapidamente; -Manter o molde fechado contrariando as fases de injeção e pós-pressão; -Separar lentamente as metades do molde e abrir rapidamente o molde, após o arrefecimento da peça moldada; -Desmoldar a peça moldada.
Injecção	<ul style="list-style-type: none"> -Fundir o material e produzir uma massa uniforme e homogénea; -Aproximar o bico do molde e mantê-lo encostado contrariando as fases de injeção e pós-pressão; -Injectar o polímero plastificado com alta pressão nas cavidades do molde.
Potência	<ul style="list-style-type: none"> -Fornecer a energia adequada aos diversos actuadores da máquina;
Controlo	<ul style="list-style-type: none"> -Monitorizar e controlar as diversas variáveis do processo; -Assegurar a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão de informação.

As máquinas injectoras podem ser caracterizadas por:

- O tipo de accionamento (hidráulico, eléctrico, pneumático ou misto);
- A natureza dos materiais a processar (termoplásticos, termoendurecíveis ou elastómeros);
- A sua dimensão (a distinção é feita pela capacidade da máquina: <1000 kN para as pequenas, >1000 kN e <5000 kN para médias e >5000 kN para grandes);
- O tipo de máquina (horizontal ou vertical);
- A unidade de comando (monitoração e controlo das diversas variáveis do processo);
- Existência de equipamento auxiliar (dispositivos para alimentação e preparação da matéria-prima, controladores de temperatura, dispositivos para separação automática de peças).

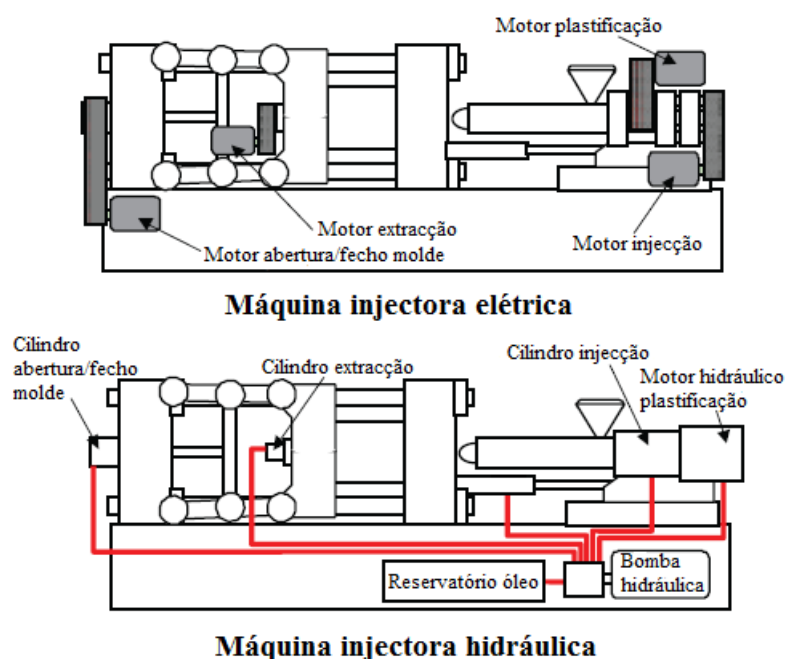


Figura 2.24: Comparação entre uma máquina injetora eléctrica e hidráulica (adaptado de [16])

Em relação ao tipo de máquina como já referido anteriormente, a máquina injetora pode ser horizontal ou vertical. Isto significa que a unidade de fecho da máquina está composta com uma abertura e fecho de molde horizontal e vertical, respectivamente sendo que a unidade de injeção tem igualmente a mesma orientação para injectar o plástico no molde. Na Tabela 2.2 são apresentadas as características destas máquinas seguidas da Figura 2.25 e Figura 2.26, exemplos de uma máquina injetora horizontal e vertical, respectivamente [16].

Tabela 2.2: Características das máquinas horizontais e verticais

<i>Máquina de injeção horizontal</i>	<i>Máquina de injeção vertical</i>
<ul style="list-style-type: none"> -Adequada para operações de extracção automáticas, com a queda livre das peças moldadas; -Facilidade na montagem e ajustamento dos moldes; -Facilidade na manutenção do cilindro e fuso; -Elevada produção devido à rápida abertura de molde e operações de fecho; -Facilidade nas operações de manutenção devido à baixa altura da máquina. 	<ul style="list-style-type: none"> -Poupança de espaço na área de instalação da máquina; -Facilidade em montar um molde relativamente maior e com mais massa devido ao maior espaço de montagem; -Melhor balanceamento do fluxo nas cavidades do molde devida à ausência de efeitos gravíticos.



Figura 2.25: Máquina injectora horizontal ENGEL Victory [17]



Figura 2.26: Máquina injectora vertical ENGEL Insert [18]

As máquinas verticais podem ainda ter um determinado número de estações, isto é, a combinação de uma metade superior do molde (fixa) com duas ou mais metades inferiores numa mesa rotativa o que permite à máquina estar a injectar material numa estação e noutra um operador realizar operações de introdução e remoção de componentes durante a fase de arrefecimento aumentando a produtividade (Figura 2.27). A rotação da mesa rotativa é realizada segundo um eixo de revolução vertical e o tempo para rotação é definido tendo em conta a capacidade da máquina e as habilidades dos operadores.



Figura 2.27: Máquina vertical ENGEL Insert com mesa rotativa (2 estações) [19]

No momento de escolher a máquina injectora para o molde os aspectos a ter em conta são: o tamanho do molde, a capacidade da máquina, o volume de dosagem tendo em conta a capacidade do cilindro e o tempo de residência do material na unidade de injeção.

2.3.1 Fuso e bico de injeção

O fuso presente no interior do cilindro da máquina de injeção por moldação é responsável por dar a qualidade necessária ao material fundido para molde. As resistências eléctricas instaladas à volta do cilindro fornecem calor para aquecer o polímero mas é o fuso que representa um papel fundamental no processo de atingir um material homogéneo gerando igualmente calor pelo atrito entre esse e o polímero. O fuso também ajuda na medição precisa do volume da quantidade de material a ser injectada no molde.

O diâmetro do fuso é dado em milímetros ou polegadas e é ligeiramente inferior ao diâmetro do cilindro. O rácio do comprimento do fuso com o seu diâmetro é representado por L/D e quanto mais elevado for este rácio, melhor é a homogeneidade do material fundido porque o tempo de trabalho mecânico que o material irá sofrer e o tempo de residência sob a acção do calor

serão maiores. Na Figura 2.28 encontra-se representado um exemplo de um fuso com a denominação dos seus componentes [1,2].

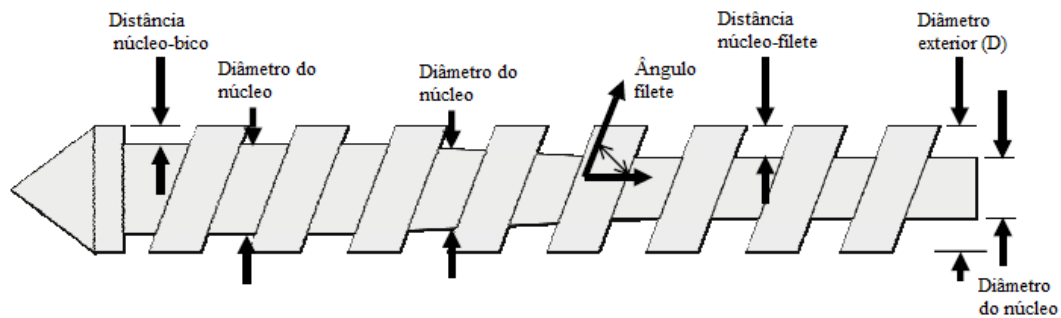


Figura 2.28: Fuso (adaptado de [2])

O fuso tem três secções ou zonas principais, cada uma delas servindo um propósito especial.

⇒ **Zona de alimentação**

Esta é a secção do fuso que recebe o material proveniente da base da tremonha e começa a elevar a temperatura do mesmo com a movimentação deste devido à rotação do fuso. Geralmente é curta, aproximadamente com 5 passos, tem por finalidade transportar grânulos sólidos para a próxima região, o diâmetro do seu núcleo permanece constante e o ângulo dos passos é de aproximadamente 15-20 graus [2], [20].

⇒ **Zona de transição/compressão**

Nesta secção, o diâmetro do núcleo aumenta gradualmente o que vai diminuindo o espaço disponível entre os passos do fuso e o cilindro e assim comprime o material. O material com a ajuda do calor proveniente das bandas de aquecimento e a forças de corte resultantes do movimento giratório do fuso faz o plástico atingir o seu ponto de fusão. O plástico atinge o final desta secção num estado fundido homogêneo. Esta é a maior secção da rosca, geralmente com 11 passos [2], [20].

⇒ **Zona de homogeneização**

Esta é a última zona e a zona mais perto do bico de injeção. O diâmetro do núcleo mantém-se constante mas é mais elevado do que as duas primeiras zonas. Como a dosagem é realizada recuando o fuso até alcançar o curso estabelecido, a altura entre o passo e o núcleo deve ser o mais pequena possível para reduzir a variação na quantidade de material em cada injeção consecutiva mas o risco de degradação do material também é maior devido ao aumento das forças

de corte logo existe uma altura mínima. Geralmente com 4 passos, nesta zona a plastificação é completada e o material atinge a sua homogeneidade máxima [2], [20].

A Figura 2.29 mostra a progressão do plástico ao longo das três zonas do fuso. Na zona de alimentação, os granulados começam a amolecer e a unir-se uns aos outros. Quando passam para a zona de transição/compressão, há uma mistura de plástico fundido e não fundido havendo evidências de granulados que foram comprimidos. A zona de homogeneização mostra o plástico completamente fundido [2].

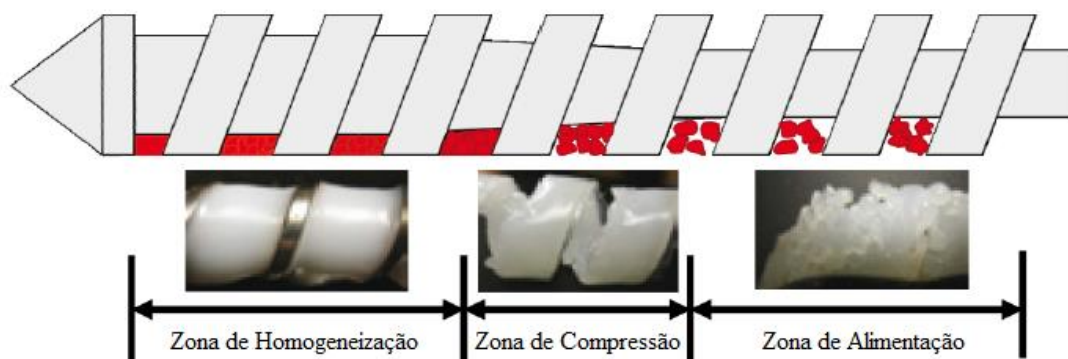


Figura 2.29: Progressão do plástico fundido ao longo das zonas do fuso (adaptado de [2])

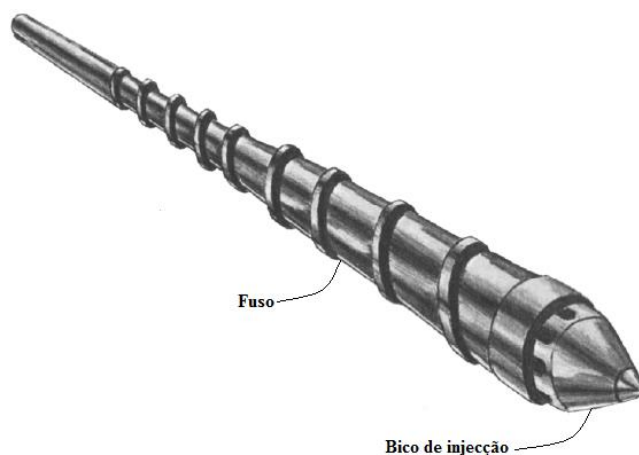


Figura 2.30: Ilustração do fuso e bico de injeção (adaptado de [15])

O bico de injeção, a última secção da fase de transporte do polímero, guia o material fundido para os canais de alimentação (Figura 2.30). A finalidade do bico do fuso é de manter a temperatura do material depois de plastificado pelo fuso e cilindro e antes de entrar no molde para formar a peça. Geralmente este é o mais curto possível para evitar sobreaquecimento do material pelo aumento do tempo de residência na dosagem. Outra parte crítica do bico é a sua ponta sendo importante que o orifício ou abertura do bico combine com a abertura da bucha de injeção tal

como se pode observar na Figura 2.31. Se estas aberturas forem iguais pode levar a que o material fique preso nesta área levando a uma degradação de material logo existe uma regra que diz que o diâmetro do orifício do bico deve ser 20% menor que o diâmetro do orifício da bucha de injeção tal [1].

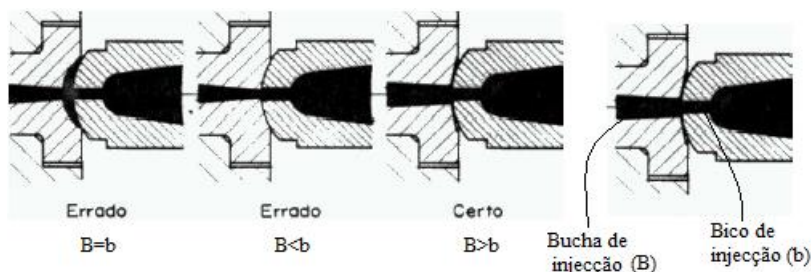


Figura 2.31: Contacto do bico de injeção (máquina injetora) com a bucha de injeção (molde) [9]

2.3.2 Anel de bloqueio

Quando o fuso avança linearmente para injectar o material no molde, parte do material pode fluir no sentido inverso e passar no pequeno espaço entre o cilindro e o fuso. Para prevenir este acontecimento, é usado um anel de bloqueio que equivale a uma válvula anti-retorno. O fuso ao avançar, a válvula recua e encosta num filete do fuso bloqueando a passagem de material (Figura 2.32, esquerda). Na fase de dosagem, o fuso tem um movimento rotativo para fundir e movimentar o material para a frente do bico de injeção. Durante essa fase, o anel de bloqueio está numa posição avançada permitindo assim a passagem de material para a frente do fuso (Figura 2.32, direita). Os anéis de bloqueio são necessários para assegurar uma pressão constante na cavidade e uniformidade de peso de ciclo a ciclo. Estes devem ser cuidadosamente projectados com tolerâncias mínimas para evitar restrições de fluxo devendo, ainda, ser perfeitamente ajustado para evitar um possível ponto de retenção. O anel de bloqueio é o item mais afectado pelo desgaste na unidade de injeção e se não for trocado a tempo pode deixar pequenas fendas na fase de injeção e deixar passar material o que irá provocar alterações na quantidade de material injectado de ciclo para ciclo logo estes devem ser verificados periodicamente e trocados aos primeiros sinais de desgaste. Os anéis de bloqueio do tipo deslizante sofrem um desgaste rápido e significativo ao serem utilizados com resinas reforçadas com fibras de vidro, especialmente quando não adequadamente endurecidos. Mesmo quando endurecidos superficialmente, estes anéis sofrem desgaste e precisam de um controlo rigoroso. Antes disso, devem ser substituídos os assentos desgastados uma vez que é importante manter uma almofada durante a injeção do polímero fundido. Foram obtidos bons resultados com aços com altos teores de cromo [1], [2], [21].

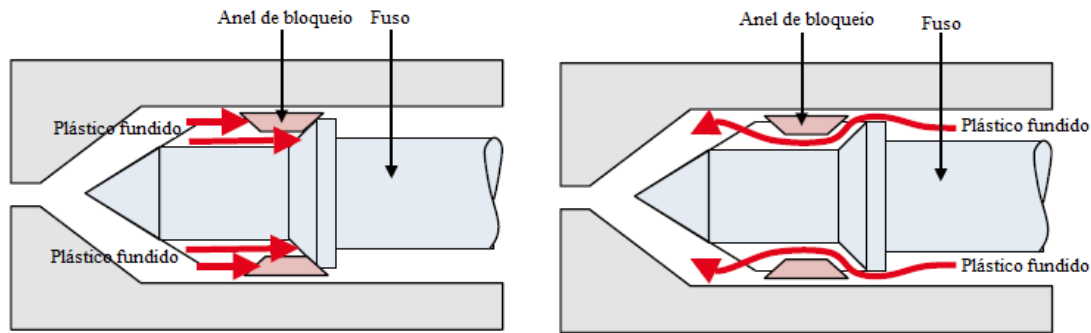


Figura 2.32: *Anel de bloqueio fechado durante a injeção (à esquerda) e aberto durante a dosagem (à direita) (adaptado de [2])*

2.3.3 Pressão de injeção

A pressão de injeção é a pressão necessária para promover o preenchimento das cavidades do molde com o plástico fundido. Esta é uma das variáveis mais importantes do processo de injeção por moldação. A pressão que é mostrada pelo leitor é uma pressão que é composta por diversas quedas de pressão: desde o aquecimento do cilindro, passando pelo bico de injeção, bucha de injeção, canais de alimentação, pontos de injeção e cavidade do molde, juntando a pressão necessária requerida no fim do fluxo para produzir uma peça densa e com uma boa superfície [1].

A intensidade desta pressão depende dos seguintes factores:

- Tipo de material: Quanto maior a viscosidade do material, mais difícil se torna o preenchimento das cavidades do molde o que leva a ser necessário uma maior pressão de injeção para fazer o material fluir. No caso de materiais que contenham fibra de vidro deve ser utilizada uma pressão de injeção mais baixa para garantir a sua integridade;
- Temperatura do molde: Quanto mais elevada for a temperatura do molde, menor será perda de temperatura do plástico fundido durante o preenchimento das cavidades, diminuindo assim o aumento da viscosidade do material. Nestes casos em que se utiliza temperaturas no molde mais elevadas é possível utilizar uma pressão de injeção menor.
- Complexidade da peça: O fluxo do material é dificultado por curvas, ressaltos, nervuras e paredes finas que para além disso causa um arrefecimento precoce do plástico, causando um aumento da viscosidade. Quanto maior for o nível de complexidade da peça, mais pressão de injeção é necessária;
- Canais de alimentação de pontos de injeção: Canais de alimentação e pontos de injeção estrangulados dificultam a passagem do plástico fundido, o que leva a ser necessário maior pressão para preencher as cavidades.

Na Tabela 2.3 é possível conferir de uma forma esquematizada os factores que influenciam a pressão de injeção.

Tabela 2.3: Factores com as variáveis que influenciam a pressão de injeção (adaptado de [12])

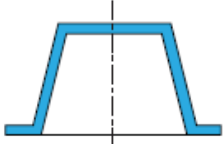
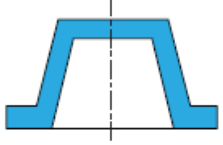
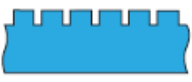


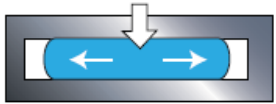
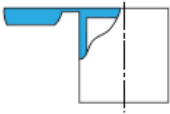
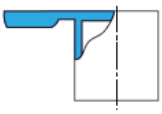


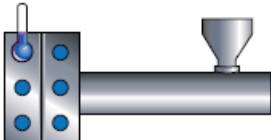
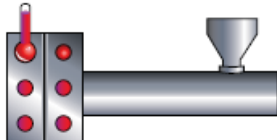






<i>Factor</i>	<i>Variável</i>	<i>Requer maior pressão de injeção</i>	<i>Requer menor pressão de injeção</i>
<i>Peça</i>	Espessura da peça	Peça fina 	Peça espessa 
	Área de superfície da peça	Maior arrefecimento 	Menor arrefecimento 
<i>Sistema Alimentação</i>	Comprimento do fluxo	Longo 	Curto 
	Ponto de injeção	Menor 	Maior 
	Diâmetro canal de alimentação	Muito pequeno ou muito largo 	Optimizado 

Tabela 2.4: Factores com as variáveis que influenciam a pressão de injeção (Continuação)

<i>Factor</i>	<i>Variável</i>	<i>Requer maior pressão de injeção</i>	<i>Requer menor pressão de injeção</i>
<i>Condições de processo</i>	Temperatura do molde	Menor 	Maior 
	Temperatura do material fundido	Menor 	Maior 
	Velocidade de injeção	Velocidade imprópria 	Velocidade otimizada 
<i>Seleção Material</i>	Fluxo do material	Baixo 	Alto 

A pressão de injeção adequada para uma determinada peça pode ser determinada iniciando a injeção com uma pressão de injeção baixa e ir aumentando gradualmente até obter-se peças de boa qualidade [20].

2.3.4 Taxa de intensificação (Intensification Ratio)

Na máquina de moldação por injeção, existe um cilindro hidráulico atrás do fuso onde é aplicada pressão hidráulica proveniente de uma bomba. A força aplicada pelo cilindro hidráulico é intensificada para o fuso e convertida em pressão de injeção devido à diferença de áreas transversais da bomba hidráulica e do cilindro. O rácio entre as áreas das secções transversais do

êmbolo e do fuso (Figura 2.33) é denominado de taxa de intensificação (IR). A pressão de injeção no bico do fuso é igual ao produto da pressão hidráulica com a taxa de intensificação [2]. O IR é então calculado pela expressão (2.1).

$$IR = \frac{P_I}{P_H} = \frac{A_r}{A_s} \quad (2.1)$$

P_I = Pressão específica de injeção

A_r = Área transversal do cilindro hidráulico

P_H = Pressão hidráulica da bomba

A_s = Área transversal do fuso

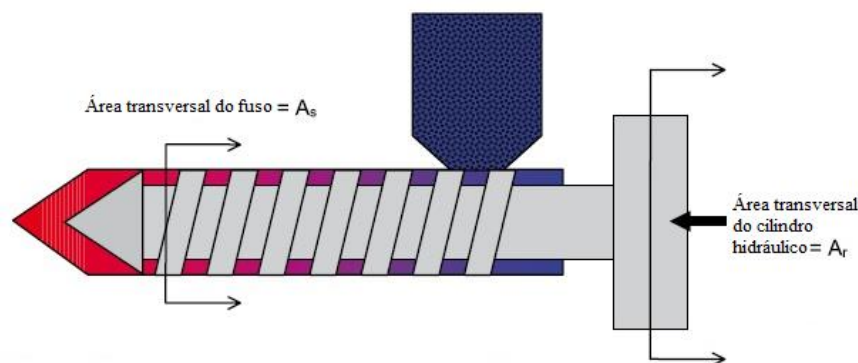


Figura 2.33: Áreas transversais dos cilindros (adaptado de [2])

Nas máquinas eléctricas não existe cilindro hidráulico e a pressão aplicada no fuso é o que o plástico recebe logo o IR para as máquinas eléctricas é 1 [2].

2.4 Receptores de material/Aspiradores

Os aspiradores (Figura 2.34) foram projectados especificamente para a função de transportar os grânulos em vácuo de um local (ao nível do chão) até uma localização elevada (tremonha). Um sistema de alimentação de material central permite que o polímero seja distribuído automaticamente para as máquinas injectoras, por vezes longas distâncias, através de uma série de tubos sólidos utilizando para esse efeito uma bomba de vácuo.



Figura 2.34: Exemplo da aspiração de material

2.5 Desumificadores

As moléculas de certos plásticos absorvem humidade até ser alcançado o equilíbrio com o ar circundante sendo esses plásticos chamados de polímeros higroscópicos. Se estes forem processados quando contêm excesso de humidade, as propriedades críticas desses polímeros podem-se degradar, muitas vezes com consequências tais como: o processamento ser afectado à medida que a humidade se transforma em vapor no cilindro, irregularidades na superfície das peças causarem problemas estéticos e ainda sérios problemas de desempenho. Embora a absorção de humidade é inevitável na peça moldada, a humidade em excesso deve ser removida a partir da resina de plástico a um nível aceitável antes da moldação, a fim de produzir uma parte aceitável. Cada plástico tem um teor de humidade máximo aceitável acima da qual podem ocorrer problemas de processamento. Se a percentagem de humidade for alta, o tempo de secagem necessário para removê-la será mais longo, enquanto a taxa de remoção de humidade por unidade de tempo será o mesmo pois apenas uma dada quantidade de humidade pode ser removida do plástico num dado espaço de tempo [2]. Os polímeros higroscópicos têm uma forte atracção pelas moléculas de água e a função do desumificador é a de fornecer ar seco aquecido visto que o calor enfraquece essa ligação do polímero com as moléculas de água fazendo-as movimentarem-se passando do polímero para esse ar. É fundamental que este passo seja bem executado visto que os produtores de resinas relatam que a vasta maioria das queixas dos clientes sobre o desempenho da resina são

consequência de uma secagem imprópria ou incompleta do material. Visto que as moléculas de água se ligam com os plásticos higroscópicos a nível molecular, torna-se complicado a quebra destas ligações e consequentemente a desumificação. Por essa razão, a tecnologia em volta dos desumificadores (Figura 2.35) continua a evoluir para que se possa encontrar soluções cada vez mais fiáveis e energeticamente eficientes.



Figura 2.35: Exemplo de um receptor de material e desumificador

2.5.1 Humidade relativa e Ponto de Orvalho

Para extrair a humidade do plástico, o ar usado para a secagem deverá ser o mais seco possível. O nível de ar seco pode ser expressado com a ajuda de dois termos: a humidade relativa e o ponto de orvalho. A humidade relativa é a percentagem de humidade que a amostra de ar possui quando comparado com a quantidade de humidade que esta pode suportar quando saturada sendo que o nível de saturação altera com a temperatura, ou seja, quanto mais baixa a temperatura, mais baixa é a quantidade de humidade que ela suporta. O ponto de orvalho indica a quantidade de humidade numa amostra de ar e é definido como a temperatura à qual a dada amostra de ar terá de baixar para alcançar 100% de humidade relativa ou saturação completa. Quanto mais alto for este ponto, maior é a quantidade de humidade no ar. Se for definida uma dada temperatura num desumificador significa que o ar a ser fornecido por este encontra-se a essa temperatura. Nessa temperatura, o ar pode ainda conter humidade, dependendo na sua humidade relativa. Para reduzir essa humidade, é utilizado bandas dissecantes que absorvem esta humidade do ar ao qual vai reduzir a temperatura à qual ele condensa, ou o seu ponto de orvalho. Pontos de orvalho mais baixos indicam que a quantidade de humidade a ser fornecida ao desumificador também é menor [2].

2.5.2 Tempo de residência

Leva algum tempo para que o ar aquecido eleve a temperatura dos granulados e para que as moléculas de água se movam para as superfícies destes. O tempo de residência dado pelos fabricantes dos materiais representa o tempo que cada material tem de permanecer à temperatura de secagem e ponto de orvalho adequados na tremonha [1]. O tempo de residência do material na tremonha pode ser calculado pela expressão (2.2).

$$\text{tempo de residência} = \frac{\text{capacidade tremonha}}{\text{produção/hora}} \quad (2.2)$$

2.5.3 Taxa de fluxo de ar

Ar quente e seco é o meio utilizado para entregar calor, atrair as moléculas de água dos polímeros e afastá-las destes. O caudal de ar deve ser suficiente para fornecer um aquecimento consistente dos grãos de plásticos e assegurar que cada grão é seco no tempo e à temperatura especificada [1].

2.6 Controladores de temperatura

Na moldação por injeção de plásticos é necessário controlar a temperatura no interior do molde porque esta afecta várias etapas do processo: a forma como o polímero se comporta quando é injectado, a maneira como este flui dentro do molde e quão rápida e consistentemente o polímero arrefece até o ponto da peça poder ser ejectada do molde. Para manter as temperaturas controladas são utilizados termorreguladores (Figura 2.36). Os termorreguladores regulam as temperaturas com um fluido térmico, fornecendo ou evacuando o calor de forma controlada [22]. Os tempos de ciclo podem ser melhorados tendo um controlador de temperatura com maior capacidade de arrefecimento e uma taxa de fluxo acoplada com melhores conexões de molde. As cristalites presentes nos polímeros cristalinos já referidas anteriormente recebem a energia necessária a sua formação na temperatura de cristalização, temperatura esta mais baixa do que a temperatura de fusão. Se o molde se encontrar demasiado frio, o polímero não será capaz de receber essa energia e consequentemente não serão formadas as cristalites. Isso levará à perda das propriedades da parte moldada. Os fornecedores de materiais realizam extensas pesquisas para determinar as temperaturas de molde operacionais que são sugeridas. Por isso mesmo é altamente recomendável ficar dentro das especificações recomendadas por estes. Como as cristalites não estão presentes nos polímeros amorfos, a gama de temperatura de moldação pode ser mais ampla e as temperaturas do molde mais baixas. No entanto, é necessário cautela para prevenir o aparecimento de tensões quando as peças são produzidas devido a temperaturas de molde demasiado baixas [2].



Figura 2.36: Exemplo de termorregulador que controla a temperatura de água pressurizada a 140 °C

2.7 Ciclo de moldação por injeção

A sequência de eventos durante a moldação por injeção de uma peça de plástico é denominada de ciclo de moldação por injeção. O ciclo começa quando o molde fecha, seguido pela injeção do polímero na cavidade do molde. Uma vez que a cavidade fique totalmente preenchida, uma pós-pressão é mantida para compensar a contracção do material. Durante a fase de arrefecimento da peça, o fuso gira, alimentando a próxima quantidade de plástico para a frente do fuso. Isto faz o fuso recuar enquanto a próxima injeção é preparada. Assim que a peça esteja suficientemente fria, o molde abre e a peça é ejectada. O tempo de ciclo total pode ser calculado usando a expressão $t_{ciclo} = t_{inj} + t_{arref} + t_{f,a,e}$ onde os tempos de fecho e extracção podem durar desde uma fracção de segundo a alguns segundos, dependendo do tamanho do molde e máquina injectora. A optimização de cada uma destas fases é extremamente importante para que se possa atingir um processo robusto. Um processo é considerado robusto quando as mudanças nos *inputs*, podendo estas serem intencionais ou devido a causas naturais, resultam num efeito mínimo na qualidade do produto [1], [2].

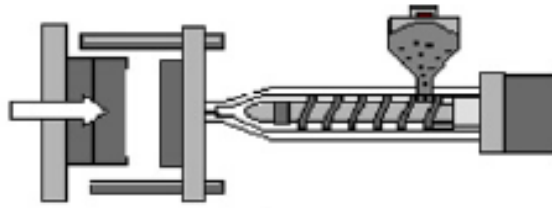


Figura 2.39: Fecho do molde [23]

- **Encosto do bico de injeção**

A unidade de injeção aproxima o bico de injeção à bucha do canal de alimentação do molde e forma uma força de encosto ajustável. Em alguns casos o bico de injeção está permanentemente encostado.

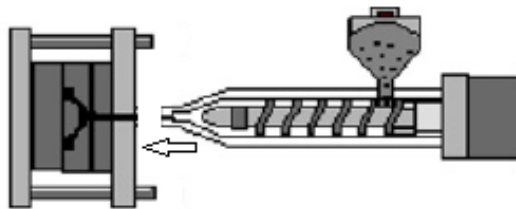


Figura 2.40: Encosto do bico de injeção [23]

- **Injecção**

Nesta fase de injeção o fuso avança linearmente com uma pressão elevada funcionando como um êmbolo e força o material fundido a entrar no molde a fluir no interior da cavidade. É definido um perfil para a velocidade de injeção e esta deve ser elevada para assegurar o preenchimento das cavidades mas assegurando sempre a qualidade do produto final visto que velocidades muito elevadas podem gerar marcas nas superfícies, efeitos de jacto ou sobreaquecimento do material polimérico. A válvula anti-retorno evita que a material fundido volte para a rosca.

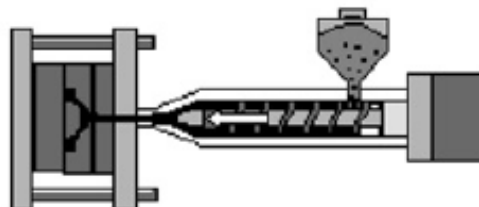


Figura 2.41: Injecção do polímero nas cavidades do molde [23]

- **Comutação**

Após o preenchimento da cavidade é necessário continuar a pressurizar o moldado para evitar espaços ocultos e combater o fenómeno de contracção do plástico que ocorre quando este arrefece devido ao contacto com a superfície do molde. Sendo assim a máquina comuta da pressão de injeção para uma pressão mais baixa fundamental à qualidade final da peça denominada pós-pressão.

- **Pós-pressão**

Esta pressão não deve ser excessiva para evitar o desenvolvimento de tensões internas e dificultar a extracção da peça mas tem de ser suficientemente elevada para que consiga preencher completamente as cavidades do molde. Esta fase termina quando o ponto de injeção (zona de entrada de material na cavidade) solidifica ao ponto de proibir a passagem de material. Nesta fase pode ser ajustado um tempo de pós-pressão e um perfil de pressão. A quantidade de material injectado nesta fase é designada de Almofada cuja principal função é evitar vazios e rechupes garantindo que esta pressão é aplicada à peça durante o tempo estabelecido de pós-pressão. Esta fase será novamente abordada, num ponto autónomo, por constituir o objecto de estudo deste trabalho.

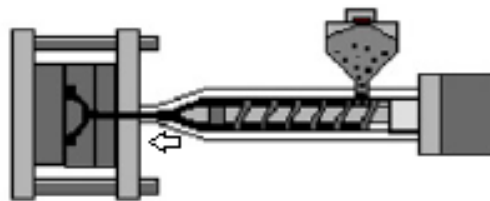


Figura 2.42: Compactação do material na cavidade do molde (pós-pressão) [23]

- **Arrefecimento**

Esta é a fase mais longa de todo o ciclo e termina quando a peça atinge uma temperatura que permita a sua extracção do molde sem deformação. Esta fase é uma operação de troca de calor entre o polímero e as superfícies do molde que por sua vez são controladas termicamente por um termorregulador sendo que a duração depende também da espessura das peças. Velocidades de arrefecimento baixas obtidas com temperaturas de molde elevadas têm a vantagem de reduzir as tensões internas criadas nesta fase mas correspondem a aumentos significativos do tempo de ciclo.

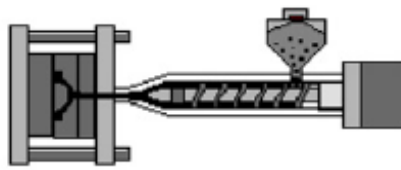


Figura 2.43: Arrefecimento da peça [23]

- ***Dosagem e recuo do bico de injeção***

A dosagem ocorre durante fase de arrefecimento. Após a pós-pressão terminar, o fuso inicia o movimento giratório iniciando a plastificação do polímero granulado para o ciclo seguinte. A plastificação provém das tensões de corte do fuso combinadas com o calor do cilindro aquecido externamente por resistências e fazem o material atingir o ponto de fusão. Durante este movimento o fuso é obrigado a recuar axialmente ao longo do cilindro devido à pressão criada pelo material que se vai depositando à frente do bico. Uma pressão contrária regulável denominada contrapressão faz com que haja uma plastificação boa e homogênea. Quando o volume definido estiver dosado, o fuso pára. Por vezes, segue-se o seu recuo linear no sentido de aliviar a pressão sobre o material fundido e evitar que este esorra pelo bico (no caso de ser um bico aberto) que se designa por descompressão.

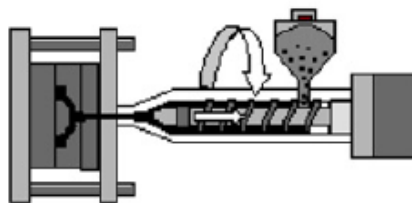


Figura 2.44: Dosagem e recuo do bico de injeção [23]

- ***Abertura do molde***

Com o fim do tempo de arrefecimento o molde abre com um perfil de velocidade abertura e curso de abertura definidos.

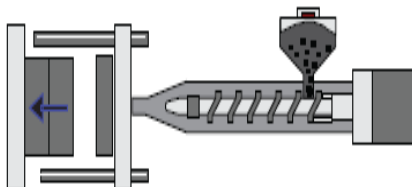


Figura 2.45: Abertura do molde [23]

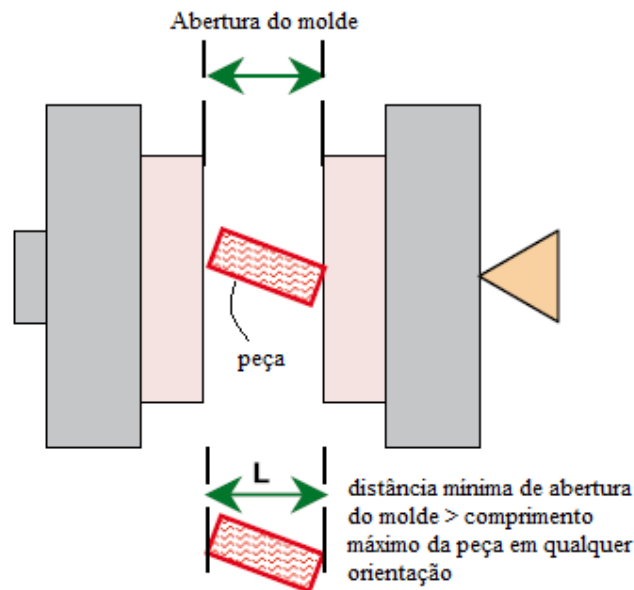


Figura 2.46: Ilustração da abertura do molde (adaptado de [2])

- **Extracção**

Depois da abertura do molde a peça (ou peças) é extraída deste sendo que o extractor, após alcançar a posição de início, extrai a peça com o auxílio de pinos extractores. Após a extracção ocorre um tempo de pausa, o ciclo finaliza e máquina inicia então um novo ciclo. Este tempo de pausa convém que seja o mais curto possível ou até mesmo nulo, não sendo muitas vezes possível devido à remoção da peça ser manual. Este tempo depende então da aptidão do operador e do nível de automatização do molde o que poderá afectar drasticamente a reprodutibilidade do processo.

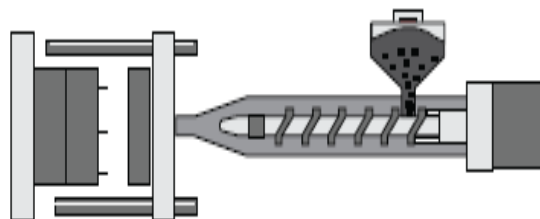


Figura 2.47: Extracção da peça [23]

2.8 Fase de pressurização

Segundo Chen e Gao [24], a pressurização após a fase de injeção desempenha um papel importante na qualidade das peças produzidas, incluindo a contracção volumétrica, rebarba, dimensões e tensões residuais. Estes realizaram um estudo do qual concluíram que a massa das

peças é fortemente afectada pelo tipo de perfil de pressurização, tendo os perfis ascendentes maior massa que os constantes e os perfis descendentes resultado em peças com menor massa. A pressão deve ter um valor mínimo de forma a superar o fenómeno da contracção volumétrica mas não deve ser excessivamente elevado sobretudo na pressão inicial visto ser muitas vezes a causa de aparecimento de rebarba nas peças. O mesmo estudo conclui ainda que a contracção tem uma relação com o perfil de pressurização semelhante à anterior com a massa, tendo as peças com um perfil descendente maiores níveis de contracção volumétrica (o que é facilmente resolvido aumentando o valor da pressão). Apesar disto, os perfis descendentes têm a vantagem de produzir peças com uma melhor distribuição de espessura. Huang e Tai [25] descrevem um estudo realizado sobre o efeito dos parâmetros de pressurização e geometria do ponto de injeção nas dimensões finais de uma peça moldada que conclui que um ponto de injeção com menor espessura confere às peças uma contracção volumétrica mais uniforme, que a pós-pressão é o factor de maior influência no fenómeno do empeno de uma peça com espessura fina com uma taxa de contribuição de 15,59% e o tempo de pós-pressão o 4º parâmetro com maior influência (9,61%). Na Figura 2.48 verifica-se a diferença nas características dimensionais de uma peça produzida com a fase de pressurização com uma produzida apenas com fase de injeção.



Figura 2.48: Exemplo de peça com e sem fase de pressurização

Metodologias e Procedimento Experimental

Neste ponto irão abordar-se as metodologias utilizadas na empresa com a qual este trabalho foi feito em parceria e que serão utilizadas no decurso deste trabalho para atingir os objectivos previamente definidos. Será apresentado também todo o procedimento experimental, tendo o seu início na construção do *Bill of Process*, passando pela reformulação da folha de *setup*, preparação de um novo molde utilizado na *Delphi Seixal*, o planeamento e realização do desenho de experiências e, por fim, a simulação da peça desse mesmo molde no *software* Moldex 3D a fim de otimizar as variáveis de processo e compará-las com as utilizadas na empresa.

3.1 Bill of Process

A construção da *Bill of Process* (BoP) tem como objectivo caracterizar o processo de injeção de plásticos, fazendo um esquema dos componentes utilizados na empresa (aspiradores, desumificadores, máquinas injectoras e controladores de temperatura), com as principais características apresentadas por níveis e indicando as entradas (factores) e saídas (respostas) dos mesmos, os denominados *inputs* e *outputs*. A *Bill of Process* pode ser consultada no Anexo D onde consta também um esquema mais detalhado do equipamento existente actualmente na empresa e respectiva quantidade. A decisão de não utilizar o molde como um componente independente na BoP, mas incluí-lo na parte das máquinas injectoras, provém do facto dos parâmetros de processo serem interdependentes. Esta *Bill of Process* servirá como suporte para a validação de novos moldes (incluindo o molde estudado nesta dissertação) que cheguem à empresa e irá ajudar na compreensão de todo o processo, desde a entrada da matéria-prima até ao produto final.

3.2 Folha de Setup

A folha de setup utilizada na empresa até ao momento encontra-se mais direccionada para os parâmetros das máquinas injectoras mais antigas e requer um método de validação que ajude os engenheiros e técnicos na compreensão do processo e maior rapidez na resolução de um eventual problema que surja durante a produção. Após reunião com o engenheiro responsável pela área dos

plásticos ficou decidido que essa folha de *setup* seria reformulada e dividida em duas: uma para os parâmetros das máquinas antigas e uma para as mais recentes, introduzindo as novas funcionalidades que estas realizam. No verso destas duas folhas ficou estipulado que estariam representados os resultados da validação do respectivo molde, a capacidade do processo, o respectivo gráfico de todo o processo de injeção e o de pressão específica de injeção e ainda um pequeno guia de resolução de problemas. Através da pesquisa realizada na literatura, manuais das máquinas injetoras e auxílio da *Bill of Process* foram então construídas estas folhas, podendo estas ser consultadas no Anexo E, Anexo F e Anexo G. O Anexo G representa o verso das folhas de *setup* sendo comum às duas.

Tendo estas novas folhas de *setup* sido apresentadas e aprovadas, foram utilizadas para a preparação de um novo molde presente na empresa. Este, como já foi referido, produz peças que compõem o revestimento das bobinas de ignição, as *Cases*. Este molde foi implementado numa das máquinas mais recentes o que significa portanto que a folha de *setup* utilizada para a validação foi a referente a este tipo de máquinas injetoras, ou seja, a folha do Anexo E.

3.3 Equipamento utilizado na validação

Neste ponto será realizada a caracterização do equipamento utilizado para a validação do molde correspondente à peça estudada.

3.3.1 Molde

O molde escolhido pela empresa para ser validado com a nova folha de *setup* tem como referência *N55 Case#6 PLT461* (Figura 3.1). A designação *N55* refere-se aos componentes pertencentes à marca alemã *BMW* como é o caso desta. A peça à qual este molde dá forma é a *Case* (Figura 3.2), componente responsável pelo revestimento do primário e secundário e é no interior desta que é inserida a resina epóxi que serve de isolamento das bobinas de ignição. Este molde tem 3 placas o que proporciona que as peças e os canais de alimentação sejam ejetados separadamente e possui ainda duas cavidades, ou seja, em cada ciclo de moldação são produzidas duas peças. Na Figura 3.3 e na Figura 3.4 é possível observar este molde fechado e aberto, respectivamente.

3.3.2 Máquina injetora

A máquina injetora utilizada para os testes tem como referência *ENGEL Victory H120* possuindo um painel de controlo *CC200* (Figura 3.5). As máquinas injetoras *ENGEL* apenas devem ser utilizadas para a fabricação de peças moldadas de termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros. A referência *H120* significa que a máquina é horizontal e possui uma força de 120 toneladas (1 200 kN). Esta máquina está equipada com um fuso de 30 mm de diâmetro, um

controlador de temperatura da marca *HB-THERM* e um desumificador *DPA20* da marca *PIOVAN*, sendo que o 20 representa a capacidade da tremonha (20 litros). Esta possui também um dispositivo hidráulico de fixação rápida que serve para uma troca simples e rápida do molde bem como para uma operação segura de colocação do molde na máquina. Visto a fábrica trocar frequentemente de moldes nas máquinas, e tendo em conta os planos de produção, essa característica torna-se uma mais-valia poupando tempo e consequentemente aumentando a produção.



Figura 3.1: Especificações do molde



Figura 3.2: Exemplo de peça retirada do molde



Figura 3.3: Molde utilizado fechado

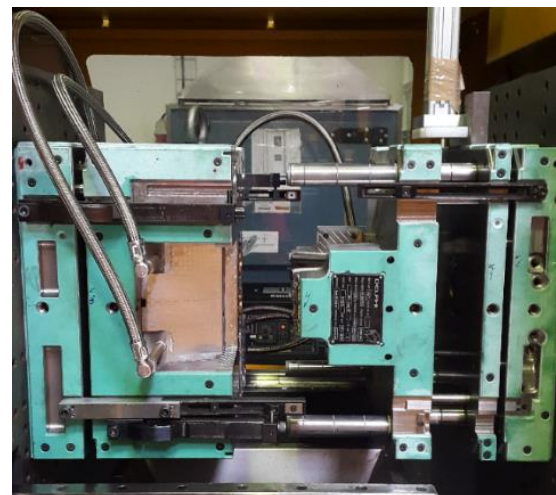


Figura 3.4: Molde utilizado aberto



Figura 3.5: Máquina injectora utilizada e painel de controlo da mesma

3.3.3 Material

A matéria-prima utilizada para a fabricação das *Cases* do N55 é o *Rynite*, marca registada da *DuPont* para as suas resinas de poliéster termoplástico baseadas no politereftalato de etileno (PET), um polímero termoplástico formado pela reacção entre o ácido tereftálico e o etileno glicol e tem como referência *Rynite RE5329 NC010* (Figura 3.6). Este polímero representa 70% dos materiais usados na área dos plásticos da *Delphi Seixal* e tem as seguintes características [21]:

- É um polímero higroscópico que, como já foi referido anteriormente, absorve humidade do ar sendo então necessário retirar esta humidade até níveis recomendados pelo fabricante antes de ser processado no interior da máquina injectora;
- É especialmente formulado para uma rápida cristalização durante o processo de moldação por injeção e é reforçado com fibra de vidro;
- É um polímero semi-cristalino o que requer uma temperatura mais elevada para atingir o seu ponto de fusão;
- Sendo uma resina de poliéster termoplástico, tem excelentes características de escoamento;
- Tem uma excelente estabilidade dimensional e resistência térmica;
- Boas propriedades eléctricas inerentes;
- Baixo nível de empeno;
- Adesão a resina epóxi.

As propriedades deste material com os valores de processamento recomendados pela marca podem ser vistos no Anexo A.



Figura 3.6: Material termoplástico utilizado

3.4 Preparação do Molde

A preparação do molde foi realizada de acordo com o estudo dos “6 passos” (*the 6-step study*) apresentado por Kulkarni [2]. Com a implementação deste método de validação pretende-se uma optimização dos tempos de ciclo, uma justificação científica para cada parâmetro crítico utilizado na folha de *setup* (velocidade de injeção, pós-pressão, tempo de pós-pressão, tempo de arrefecimento, tempo de ciclo,...) e uma melhor compreensão do processo de injeção.

3.4.1 Estudo da Viscosidade

Este primeiro estudo tem como objectivos definir a velocidade de injeção que minimiza a variação da viscosidade devido a alguma hesitação da unidade de injeção e tentar minimizar variações de máquina para máquina no processo de injeção. O procedimento utilizado para a realização deste estudo foi o seguinte:

- Definição da temperatura do material de acordo com a recomendação do fabricante;
- Colocação a zero de todos os parâmetros de pós-pressão (o teste realiza-se apenas com a fase de injeção);
- Definição da pressão de injeção para o máximo valor disponível (130 bar);
- Definição de um valor seguro para o tempo de arrefecimento, de modo a que a peça arrefeça e atinja a temperatura de extracção antes de o molde abrir (utilizando o valor de um molde que produz as mesmas peças);
- Introdução de um valor de velocidade de injeção baixo (35 mm/s) para que a peça tenha uma baixa % de enchimento;
- Registo do tempo de injeção e do pico de pressão hidráulica;

- Aumento incremental da velocidade de injeção até perto do valor máximo, garantindo que as peças continuam com uma taxa de enchimento baixa (95-98%) e registando sempre aqueles dois parâmetros.

Ao todo foram registadas 11 valores de velocidades de injeção diferentes com os respectivos valores dos picos de pressão, estando as peças correspondentes representadas na Figura 3.7. Foram ainda registados o curso do fuso (C1) e o curso de comutação (C3) utilizados na injeção das peças moldadas. A sua diferença corresponde, em termos volumétricos, ao volume de dosagem (VS) que corresponde à diferença entre os dois cursos mencionados anteriormente vezes a área do fuso. Para este efeito, o VS será dado apenas como a diferença entre os mesmos. Este valor é importante para manter a consistência do processo no caso de o molde ser instalado noutra máquina injectora ou que seja introduzido um fuso de diâmetro diferente.



Figura 3.7: Peças retiradas da máquina injectora para o estudo da viscosidade

Para se obter a velocidade de injeção foi projectado um gráfico viscosidade em função da velocidade de injeção. Os valores da viscosidade foram obtidos multiplicando os dois parâmetros registados em cada peça pela taxa de intensificação do fuso da máquina, ou seja, pela expressão (3.1).

$$\text{Viscosidade} = \text{Pico de pressão injeção} \times \text{tempo de injeção} \times IR_{\text{fuso}} \quad (3.1)$$

Estes valores foram registados na Tabela 3.1, tendo sido utilizada uma taxa de intensificação de 10 (IR=10).

Em seguida foi projectado o gráfico da Figura 3.8 e foi escolhida uma velocidade de injeção na zona em que a viscosidade estabiliza e é praticamente constante (75 mm/s).

Tabela 3.1: Teste de viscosidade

<i>Peça</i>	<i>Velocidade de injeção (mm/s)</i>	<i>Pressão de injeção (bar)</i>	<i>Tempo de injeção (s)</i>	<i>Viscosidade (bar.s)</i>
1	35	93.9	1.19	1117.4
2	40	92.4	1.05	970.2
3	45	92.5	0.94	869.5
4	50	93.6	0.85	795.6
5	55	93.4	0.78	728.5
6	60	95.2	0.72	685.4
7	65	95.5	0.66	630.3
8	70	95.3	0.62	590.9
9	75	95.4	0.59	562.9
10	80	96.6	0.57	550.6
11	85	97.6	0.56	546.6

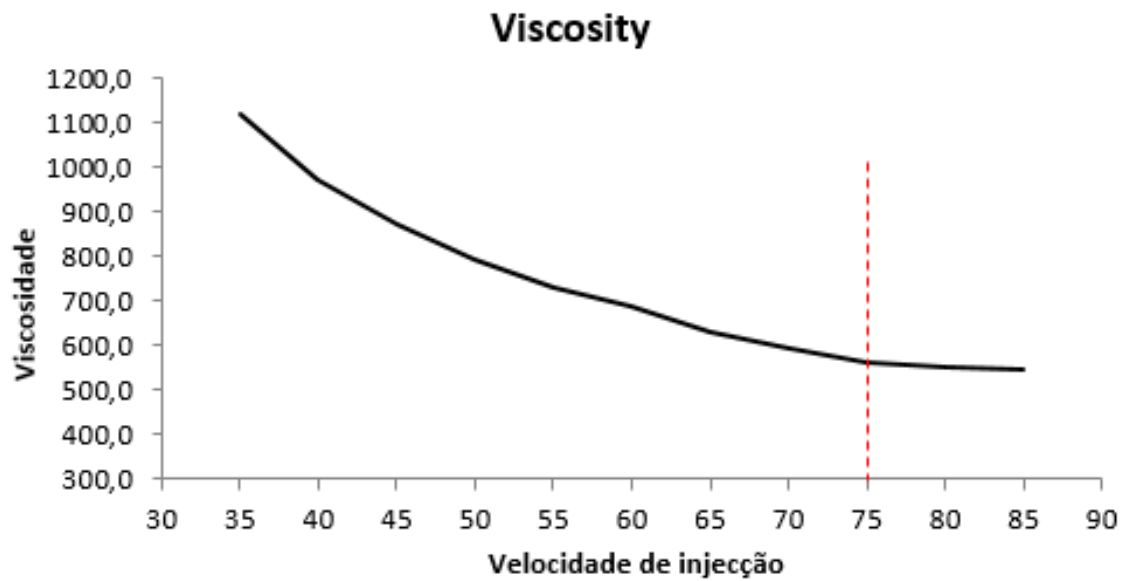


Figura 3.8: Gráfico viscosidade em função da velocidade de injeção

3.4.2 Estudo do Balanceamento das Cavidades

No estudo do balanceamento das cavidades o objectivo é minimizar variações da massa de cavidade para cavidade devido a injeções desequilibradas, neste caso serão então analisadas as duas cavidades (denominadas cavidade 12 e cavidade 13). Tal como no estudo da viscosidade foi utilizada apenas a fase de injeção. O procedimento para este estudo foi o seguinte:

- Colocação a zero de todos os parâmetros de pós-pressão;
- Definição o tempo de arrefecimento para um valor que se assegure que a peça irá arrefecer suficientemente para ser extraída;
- Definição da velocidade de injeção para o valor obtido do estudo da curva da viscosidade (75 mm/s);
- Moldação das peças com diferentes taxas de enchimento (25%, 50%, 75% e end of fill) para determinar a diferença máxima de massa entre as cavidades.
- Foram retiradas 5 peças de cada cavidade para cada taxa de enchimento e posteriormente registadas as suas massas.

Na Figura 3.9 é possível observar uma peça de cada cavidade para as diferentes taxas.



Figura 3.9: Peças do estudo de balanceamento das cavidades

Os valores da massa das peças com as respectivas diferenças entre cavidades encontram-se na Tabela 3.2 e na

Tabela 3.3. Na

Tabela 3.4 está apresentada a média das massas de 5 peças foi para cada cavidade.

Tabela 3.2: Diferença entre cavidades para 25 e 50%

%Enchimento							
25%				50%			
<i>Cav 12</i>	<i>Cav 13</i>	ΔCav	% Desvio	<i>Cav 12</i>	<i>Cav 13</i>	ΔCav	% Desvio
8.2845	8.3060	0.0215	2.15%	9.8213	9.8237	0.0024	0.24%
8.1042	8.0942	0.0100	1.00%	9.7057	9.6942	0.0115	1.15%
8.1791	8.1583	0.0208	2.08%	9.5803	9.5897	0.0094	0.94%
8.0231	8.0201	0.0030	0.30%	9.7165	9.7246	0.0081	0.81%
8.0200	8.0195	0.0005	0.05%	9.7030	9.6978	0.0052	0.52%

Tabela 3.3: Diferença entre cavidades para 75%e EOF

%Enchimento							
75%				EOF			
<i>Cav 12</i>	<i>Cav 13</i>	ΔCav	% Desvio	<i>Cav 12</i>	<i>Cav 13</i>	ΔCav	% Desvio
11.053	11.031	0.022	2.20%	12.7701	12.7728	0.0027	0.27%
11.0957	11.0794	0.016	1.63%	12.6906	12.6804	0.0102	1.02%
10.9522	10.949	0.003	0.32%	12.7408	12.7554	0.0146	1.46%
11.0462	11.033	0.013	1.32%	12.6204	12.6371	0.0167	1.67%
11.0772	11.054	0.023	2.32%	12.6034	12.6094	0.006	0.60%

Tabela 3.4: Massa média das peças

Taxa enchimento (%)	Massa média Peças (g)			
	<i>Cavidade 12</i>	<i>Cavidade 13</i>	<i>Desvio</i>	%Desvio
25%	8.12218	8.11962	0.00256	0.256
50%	9.70536	9.706	0.00064	0.064
75%	11.04486	11.02928	0.01558	1.558
EOF (95-98%)	12.68506	12.69102	0.00596	0.596

Na Figura 3.10 está representado o gráfico da massa média das peças em função da taxa de enchimento, para cada cavidade. A diferença entre cavidades deve ser menor que a maior diferença observada entre as rectas. Caso exista uma diferença muito díspar, o molde deverá ser sujeito a rectificações por parte do fabricante. Observou-se uma diferença máxima entre cavidades de 0.016 g (1.6%) verificada para a taxa de enchimento de 75%.

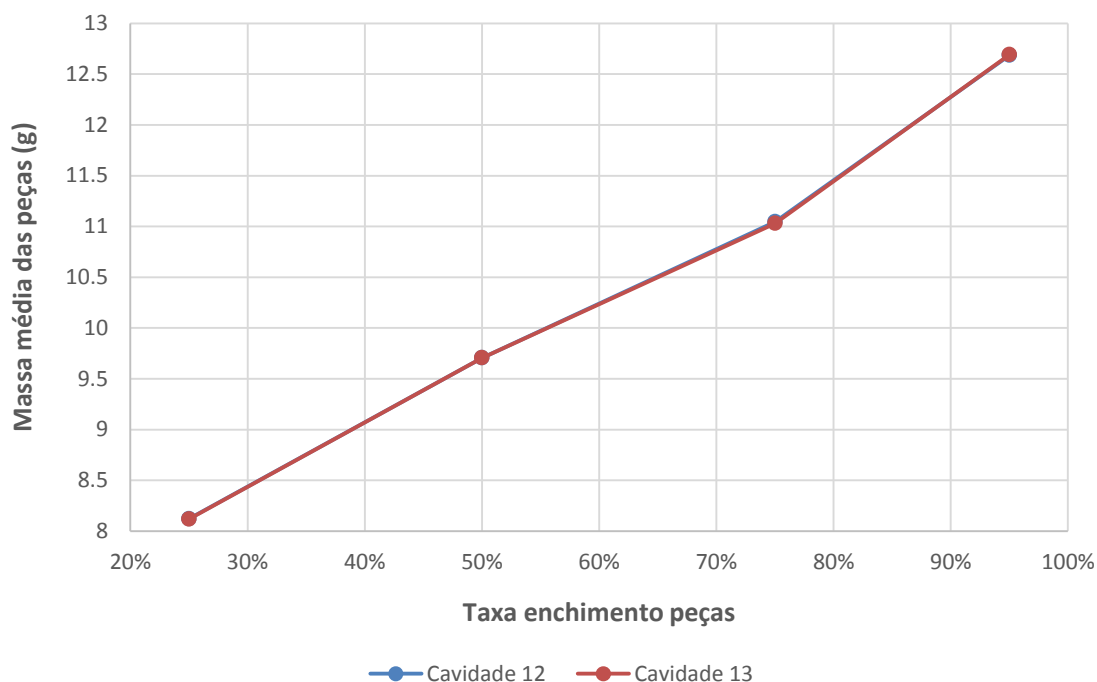


Figura 3.10: Gráfico massa média das peças em função da taxa de enchimento

3.4.3 Estudo da Queda de Pressão

O estudo da queda de pressão tem como objectivo identificar a secção que está sujeita a uma maior perda de pressão e que deve ser alvo de maior atenção, ao ser gerado o perfil de queda de pressão durante o processo de injeção. Neste estudo seguiu-se o seguinte procedimento:

- Definição das temperaturas do molde e do cilindro (temperaturas de processo da máquina) e da velocidade de injeção (de acordo com o teste da curva de viscosidade);
- Colocação a zero de todos os parâmetros de pós-pressão;
- Definição da pressão hidráulica como a máxima disponível na máquina (130 bar);

- Realização de uma injeção com ar e anotação do pico de pressão requerido (doseamento sem material);
- Início da injeção, a 130 bar, e registo do valor do pico de pressão;
- Decremento da pressão para 119.2 bar de modo a que o material preencha a cavidade 95-98% e registo do pico de pressão;
- Repetição do mesmo procedimento para 90.1 bar (75% preenchimento), 38.5 bar (15%) e 19.5 bar (5 %).

Na Figura 3.11 podem observar-se as peças retiradas da máquina. Foi então construído o gráfico pico de pressão versus secção (% enchimento) para gerar o perfil de queda de pressão (Figura 3.12), a partir dos dados da Tabela 3.5: Dados do estudo da queda de pressão.

Tabela 3.5: Dados do estudo da queda de pressão

<i>Taxa enchimento</i>	<i>Pico de pressão hidráulica (bar)</i>	<i>Pressão específica de injeção (bar)</i>	<i>Pressão específica de injeção (Psi)</i>
25%	19.5	350	5076
50%	38.5	550	7977
75%	90.1	1200	17405
EOF	119.2	1650	23931
Pressão máxima	130	1800	26107

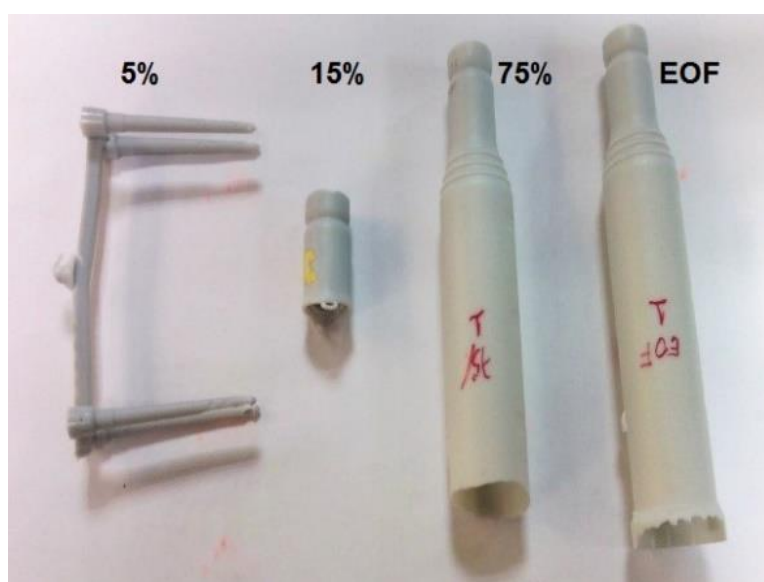


Figura 3.11: Peças retiradas do estudo da queda de pressão

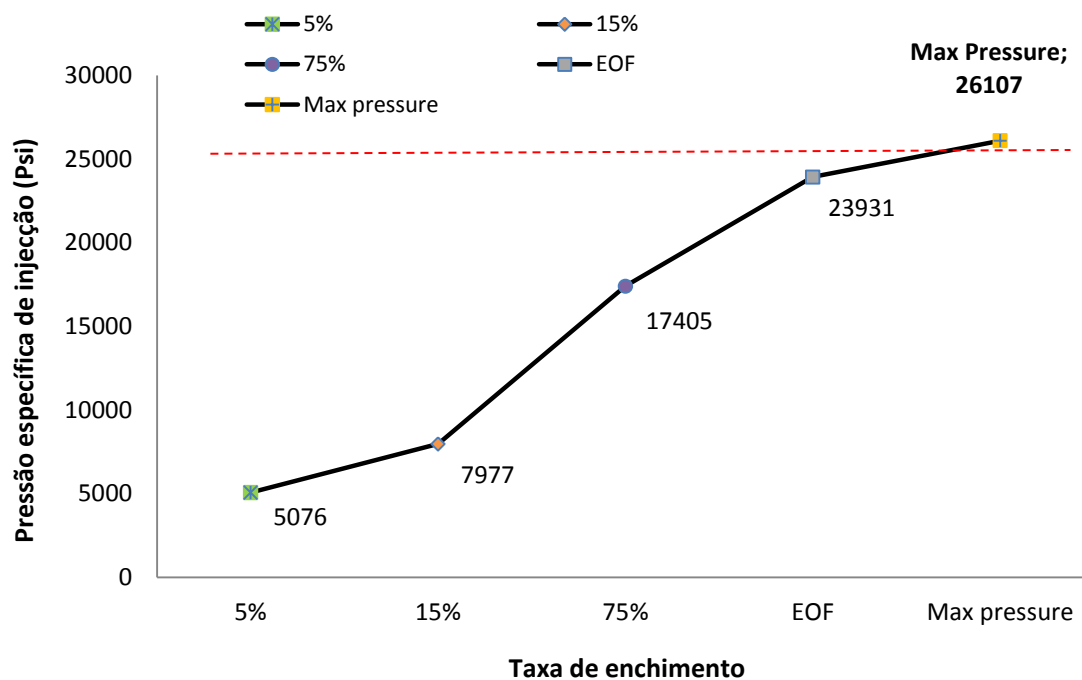


Figura 3.12: Gráfico do perfil de queda de pressão

Na Tabela 3.6 estão registadas as quedas de pressão entre as diferentes fases injectadas utilizadas neste estudo. Pelos valores obtidos é possível comprovar que a maior queda de pressão ocorre entre o enchimento de 15% da peça para 75% da mesma.

Tabela 3.6: Valores da queda de pressão

Área fluxo	Pico de pressão hidráulica (bar)	% do Máx.	Δ Pressão	% Δ Pressão
Canais Alimentação	19.5	15%	19.5	15%
15% Peça	38.5	29.6%	19	14.6%
75% Peça	90.1	69.3%	51.6	39.7%
EOF	119.2	91.7%	29.1	22.4%
Máximo	130	100%	10.8	8.3%

3.4.4 Estudo da Janela de Processo

O objectivo do estudo da janela de processo (também chamada de diagrama da área de moldação) é definir os limites de pós-pressão e temperatura do molde para tornar o processo de injeção mais robusto e previsível. Os testes necessários para definir a janela de processo são diferentes para materiais amorfos e cristalinos. Assim, deve ser definido um procedimento para cada um destes tipos de materiais. Contudo, é de referir que actualmente, na empresa, apenas é seguido o procedimento para materiais cristalinos porque ao fazer variar a temperatura do material em materiais amorfos e tendo este um comportamento não-linear, surgem diversos problemas. O procedimento para este estudo foi o seguinte:

- Definição da temperatura do molde para o valor desejado (material cristalino = 140 °C) e da temperatura do material fundido para um valor médio dentro da gama de temperaturas recomendadas (285 °C);
- Definição da velocidade de injeção com o valor obtido a partir da curva de viscosidade (75 mm/s) e todos os parâmetros de pós-pressão iguais a zero;
- Início da moldação e ajuste da posição de comutação para que se obtenha uma peça preenchida entre 95 e 98%;
- Repetição do processo aumentando a pós-pressão em pequenos incrementos (de 10 bar) até atingir peças visualmente aceitáveis;
- Continuação do aumento dos valores da pós-pressão até se iniciar o aparecimento de outros defeitos;
- Registo dos resultados para definir a janela de pós-pressão e temperatura para o processo (Tabela 3.7).

Apesar das peças obtidas com uma pós-pressão de 100 bar serem aceitáveis, o valor máximo será 90 bar por questões de segurança devido às folgas existentes por o molde ser novo. A janela de processo está representada na Figura 3.13 com o gráfico de pós-pressão em função da temperatura do molde.

Tabela 3.7: Dados e observações do estudo da janela de processo

Temperatura do Molde (°C)	Pós-pressão (bar)	Observações
140	0	Nok - Peças não preenchidas; - Vazios internos e externos - Fissuras no lado HV
	10	Nok - Peças não preenchidas - Vazios internos e externos - Fissuras no lado HV
	20	Nok - Vazios internos e externos - Fissuras no lado HV
	30	Nok - Vazios internos e externos
	40	Nok - Vazios internos
	50	Nok - Vazios internos
	60	Nok - Vazios internos
	70	OK - Peças aceitáveis
	80	OK - Peças aceitáveis
	90	OK - Peças aceitáveis
	100	OK - Peças aceitáveis
	110	Nok - Rebarba na linha de separação

(**Nok** – não conforme; **OK** – conforme)

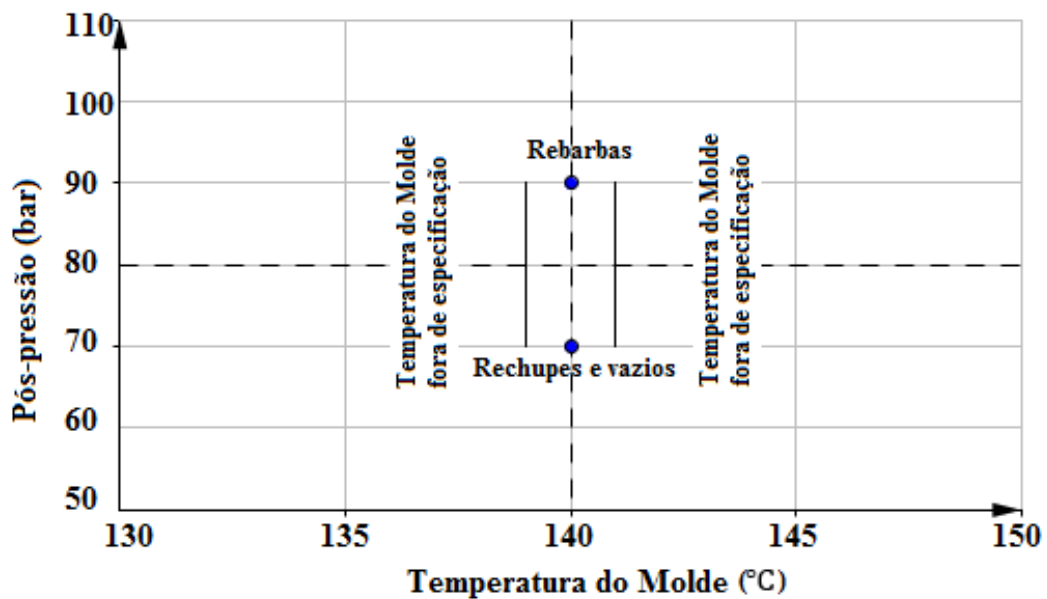


Figura 3.13: Gráfico da janela de processo

3.4.5 Estudo da Solidificação do Ponto de Injecção

Este estudo tem a finalidade de definir o tempo necessário para que o ponto de injeção arrefeça e solidifique (tempo de pós-pressão). Após esse tempo será desnecessário continuar a comprimir o plástico para dentro da cavidade. O procedimento realiza-se da seguinte forma:

- Definição da pós-pressão para o valor do estudo da janela de processo e do tempo de arrefecimento para um valor que garanta que a peça arrefeça antes da injeção;
- Definição da velocidade de injeção com o valor obtido no teste de viscosidade;
- Colocação a zero do tempo de pós-pressão e início da injeção das peças;
- Aumento do tempo de pós-pressão para 1 s e recolha de uma peça de cada cavidade sujeita a esse tempo;
- Repetição do procedimento com aumentos de pós-pressão em incrementos de 1 s (até 6 s).
- Medição da massa das peças obtidas em cada cavidade para os diferentes tempos (Tabela 3.8) e obtenção do respectivo gráfico em função do tempo de pós-pressão.

Tabela 3.8: Dados do teste da solidificação dos pontos de injeção

<i>Massa Peças (g)</i>		
<i>Tempo de pós-pressão (s)</i>	<i>Cavidade 12</i>	<i>Cavidade 13</i>
1	13.1525	13.199
2	13.4912	13.524
3	13.6522	13.652
4	13.8523	13.8785
6	13.8425	13.8623

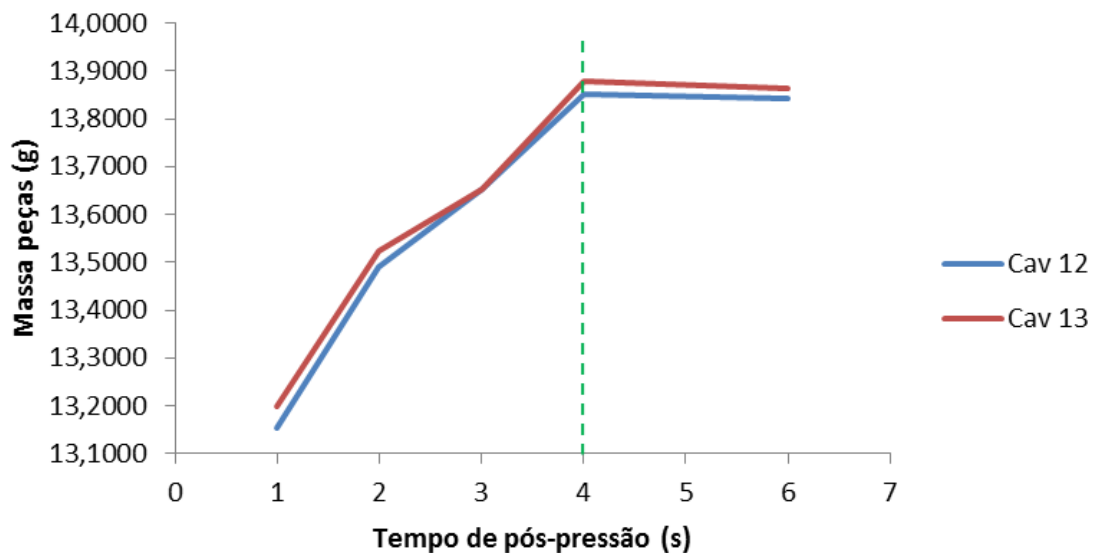


Figura 3.14: Gráfico massa das peças em função do tempo de pós-pressão para as duas cavidades

A partir da representação do gráfico da Figura 3.14, foi registado o tempo de solidificação dos pontos de injeção pois este tempo é aquele após o qual as massas das peças permanecem constantes.

3.4.6 Estudo do Tempo de Arrefecimento

O estudo do Tempo de Arrefecimento tem como objectivo definir o tempo necessário para que as peças se encontrem dimensionalmente estáveis antes da extracção. Este é o estudo mais moroso porque é necessária a utilização não só da máquina injectora mas também de uma máquina de medição de coordenadas. Dado não ter sido possível realizar este estudo, foi utilizado o tempo de arrefecimento dos moldes que produzem as mesmas peças, pelas suas similaridades (8 s). No

entanto, fica em seguida descrito o procedimento do referido estudo de arrefecimento a realizar na validação dos moldes:

- Definição das condições do processo de acordo com os estudos realizados anteriormente (viscosidade, janela de processo e solidificação dos pontos de injeção) e as dimensões críticas das peças, isto é, dimensões que dependem do tempo de arrefecimento;
- Moldação das peças sem tempo de arrefecimento e registo do valor obtido para cada dimensão crítica;
- Aumento do tempo de arrefecimento em 1 s entre cada medição e correspondente registo do valor da dimensão crítica em causa.
- Obtenção do gráfico da dimensão em função do tempo de arrefecimento. Este é analisado para ver como as dimensões críticas variam com o tempo de arrefecimento. Com base nesses dados, é escolhido o tempo de arrefecimento que melhor se adequa.

3.5 Desenho de Experiências (DOE) e Metodologia de Superfície de Resposta (RSM)

Um processo produtivo é essencialmente um sistema onde as entradas (*inputs*) são transformadas em saídas (*outputs*), tal como está representado na Figura 3.15. As entradas podem ser factores controláveis (pressões, velocidades, temperaturas) ou não controláveis (condições ambientais, matéria-prima com grande variabilidade) e as saídas são as características intrínsecas dos produtos apelidadas de características da qualidade, as quais devem satisfazer plenamente o cliente interno ou externo à organização [26].

No sector automóvel, o mercado é muito competitivo e o consumidor cada vez mais exigente o que torna a margem de erro cada vez menor. Desta forma, é indispensável que as empresas utilizem metodologias organizacionais para a melhoria da produtividade. O recurso a ferramentas estatísticas que têm vindo a ser desenvolvidas para o estudo e melhoria dos produtos é cada vez mais frequente, assim como a adopção de novas filosofias e metodologias de controlo do processo. O Desenho de Experiências (*Design of Experiments*) associado à filosofia de *Taguchi*, ou à Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*) são alguns exemplos destas ferramentas.

O Desenho de Experiências é o planeamento de uma série de testes no qual se efectuam alterações propositadas de alguns parâmetros do processo (factores) para observar os efeitos que ocorrem numa ou mais características da unidade experimental (entidade na qual são feitas as

medições de uma ou mais características) e identificar as respectivas causas. Os valores que os factores assumem designam-se por níveis, podendo estes ser qualitativos ou quantitativos. Este método estatístico permite determinar quais são os factores controláveis que afectam determinadas características da qualidade e quais os melhores níveis desses factores de forma a aumentar a resistência do produto aos factores não controláveis ou de ruído, satisfazendo assim os requisitos de desempenho. A replicação é a repetição de uma experiência ou ensaio sob condições análogas sendo importante na realização do desenho de experiências porque permite obter uma estimativa do erro experimental e uma estimativa mais eficiente dos efeitos dos factores. Nesta dissertação pretende-se estudar os parâmetros de pressurização na qualidade de uma peça termoplástica. Tendo em conta que existem dois parâmetros de pós-pressão (tempo e pressão), o desenho de experiências será realizado com estes dois factores que são controláveis, com três níveis quantitativos cada, e serão observados os efeitos destes na resposta quando os factores mudarem de nível [26].

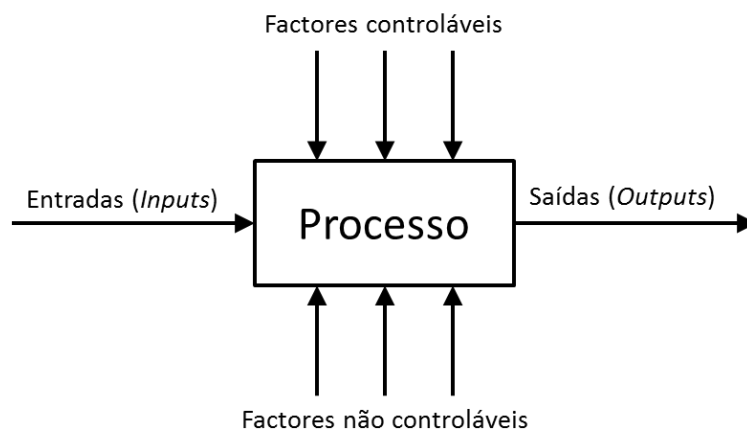


Figura 3.15: Representação esquemática de um processo

Os planeamentos experimentais e respectivas concretizações não têm de ser complexos para serem bem-sucedidos. Pelo contrário, desenhos de experiências simples mas bem planeados e executados conduzem a conclusões mais importantes.

Para proceder à análise dos dados, Taguchi criou uma metodologia para transformar os dados, a partir de experiências repetidas, seja por repetição ou replicação, que é uma medida da variabilidade. A transformação dos dados é feita pela razão Sinal-Ruído (S/N) que consolida várias repetições num valor que reflecte a variação presente. Foram desenvolvidas várias expressões que permitem a transformação dos dados numa razão sinal-ruído, dependendo do tipo de característica da qualidade, sendo as mais conhecidas “Menor-é-melhor”, “Nominal-é-melhor” e “Maior-é-melhor”. No tipo de característica da qualidade “Nominal-é-melhor”, utilizado neste trabalho, as respostas são do tipo contínuo e não negativas, e vão de zero até infinito. Este tipo de problema tem um valor objectivo diferente de zero e a variância é zero quando a média é zero. Para determinar a

razão sinal-ruído utiliza-se a equação (3.2), onde $(S/N)_i$ é a razão sinal-ruído da experiência $i = 1, 2, \dots, n$ em decibéis (dB), \bar{Y}_i^2 é a média amostral da experiência i , s_i^2 é a variância amostral da experiência i e n o número de observações em cada experiência [26].

$$(S/N)_i = 10 \log \left[\frac{\bar{Y}_i^2}{s_i^2} - \frac{1}{n} \right] \quad (3.2)$$

Se o número de observações for igual em todas as experiências, então a equação (3.3) pode ser utilizada no cálculo da razão sinal-ruído.

$$(S/N)_i = 20 \log \left[\frac{\bar{Y}_i}{s_i} \right] \quad (3.3)$$

RSM é um conjunto de técnicas criadas para encontrar o melhor valor da resposta. Se descobrir o melhor valor ou valores de resposta está além dos recursos disponíveis da experiência, então os métodos de resposta de superfície são usados para pelo menos ganhar um maior conhecimento do sistema de resposta no geral. Estas técnicas consistem no planeamento da experiência e na análise subsequente dos dados experimentais. Na maioria dos casos, o comportamento da resposta medida é governada por certas leis que podem ser factores experimentais, e assim deverá ser possível determinar as melhores condições (níveis) dos factores para otimizar um desejado output. Normalmente esta relação é muito complexa ou desconhecida e é necessário uma aproximação empírica. A estratégia utilizada nessa tal aproximação é a base do método de superfície de resposta [27].

Após a realização dos ensaios deve utilizar-se a análise de variância para o tratamento dos resultados obtidos. Esta análise permite determinar de forma objectiva quais os factores e/ou interacções que afectam significativamente as respostas, através do valor de adequabilidade do modelo, R^2 . Posteriormente é possível determinar a combinação de níveis que conduz à optimização. Segundo Pereira e Requeijo [26], a análise da variância (ANOVA) é uma técnica estatística que permite proceder à comparação entre parâmetros de duas ou mais populações. Esta análise possibilita a repartição da variabilidade total dos dados experimentais pelas diversas componentes causadoras da variabilidade, sendo assim possível determinar que componentes são estatisticamente significativas.

No contexto deste trabalho, será utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta por se procurar a compreensão do sistema global de resposta, através da quantificação da relação entre os valores das variáveis de resposta e os valores do conjunto de factores experimentais que se presume afectarem a resposta. Uma vez que se pretende utilizar esta metodologia, o planeamento de experiências deverá ser orientado para tal. O conjunto de ensaios a realizar deverá permitir estimar

as interações e os efeitos quadráticos dos factores e fornecer uma ideia da forma da superfície de resposta a ser investigada. Este tipo de planeamento é habitualmente utilizado para:

- Encontrar as melhores configurações do processo;
- Solucionar problemas ou fragilidades do processo;
- Tornar o processo mais robusto às influências externas e não controláveis.

Um planeamento composto central contém um planeamento factorial fraccional embutido com pontos centrais que são aumentados com um grupo de pontos que permitem estimar a curvatura. Um planeamento composto central do tipo circunscrito (CCC) é a forma original de um planeamento composto e explora um maior domínio das variáveis comparativamente com os outros tipos. Existem pontos a uma distância α do centro que estabelecem novos extremos para uma configuração baixa e alta em todos os factores. O valor de α depende de certas propriedades desejadas para o planeamento e do número de factores envolvidos.

Uma vez que se trata de um processo industrial, a melhor aproximação será realizada através da utilização de um modelo quadrático que utiliza um polinómio de segundo grau para representar matematicamente a função da superfície de resposta (equação (3.4)), onde x_i e x_j são as variáveis de controlo (representam os níveis de cada factor); β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} os coeficientes do polinómio (obtidos por regressão), k representa o número de factores considerados para a experiência e ϵ o erro [28].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.4)$$

O número de coeficientes $n\beta$ pode ser calculado através da equação (3.5) [29].

$$n\beta = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (3.5)$$

O planeamento composto central do tipo circunscrito é a forma mais comum para ajuste deste modelo e consiste num planeamento factorial $2k$, onde são adicionadas $2k$ experiências axiais e n_c experiências centrais. Assim, o número total de experiências é dado pela equação (3.6) [29], na qual:

• $n_f = 2k$ pontos de um planeamento factorial completo, correspondentes aos vários vértices de um cubo k -dimensional $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$;

- $2k$ pontos correspondentes aos vértices de uma estrela k -dimensional, centrada no cubo anterior, designados por pontos estrela $(\pm\alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm\alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm\alpha)$;
- $n_c \geq 1$ pontos centrais $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$;

$$N = n_f + 2k + n_c \quad (3.6)$$

Na Figura 3.16 está representado um exemplo de um planeamento composto central circunscrito no qual a área do círculo representa o domínio das variáveis, os pontos vermelhos representam os dois factores a três níveis $(-1, 0, 1)$ e os pontos verdes os novos extremos α $(-\alpha, -1, 0, 1, +\alpha)$. Para determinar α no caso de um planeamento factorial completo utiliza-se a equação (3.7), sendo k o número de factores. Como no caso a estudar são 2 factores (pós-pressão e tempo de pós-pressão), então $|\alpha| = 1,41$ [30].

$$\alpha = [2^k]^{\frac{1}{4}} \quad (3.7)$$

Na Tabela 3.9 encontram-se os valores dos factores de pressurização que serão utilizados no desenho de experiências. Para atribuição dos valores das variáveis correspondentes a cada um dos níveis foi considerado o domínio das duas variáveis pretendido para análise neste trabalho. Os valores altos e baixos de cada factor foram seleccionados a partir dos resultados dos ensaios de preparação do molde garantindo uma gama de funcionamento exequível.

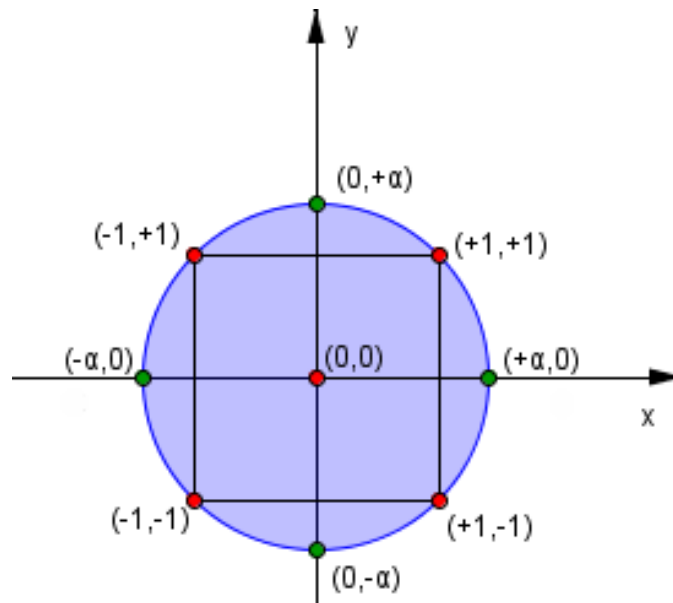


Figura 3.16: CCC com coordenadas dos pontos

Tabela 3.9: Atribuição dos valores das variáveis

DOE		Níveis				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
<i>Factores de pressurização</i>	<i>Tempo (t)</i>	2.5	2.9	3.75	4.6	5
	<i>Pressão (P)</i>	70	72.9	80	87.1	90

No total são 13 as experiências a realizar sendo que apenas serão realizadas as simulações das primeiras 9 (as últimas 5 experiências correspondem aos pontos centrais do planeamento). Os parâmetros de pós-pressão dos 13 ensaios podem ser observados na Tabela 3.10. Irão ser estudadas as duas cavidades do molde e sendo que estas 13 experiências vão ser replicadas três vezes o número total de peças obtidas neste Desenho de Experiências são 78 (39 por cada cavidade).

Tabela 3.10: Planeamento DOE

Ensaio (peças)			Factores			
<i>Réplica 1</i>	<i>Réplica 2</i>	<i>Réplica 3</i>	<i>t</i>	<i>t [s]</i>	<i>P</i>	<i>P [bar]</i>
P1.1	P1.2	P1.3	-1	2.9	-1	72.9
P2.1	P2.2	P2.3	1	4.6	-1	72.9
P3.1	P3.2	P3.3	-1	2.9	1	87.1
P4.1	P4.2	P4.3	1	4.6	1	87.1
P5.1	P5.2	P5.3	-1.414	2.5	0	80
P6.1	P6.2	P6.3	1.414	5	0	80
P7.1	P7.2	P7.3	0	3.75	-1.414	70
P8.1	P8.2	P8.3	0	3.75	1.414	90
P9.1	P9.2	P9.3	0	3.75	0	80
P10.1	P10.2	P10.3	0	3.75	0	80
P11.1	P11.2	P11.3	0	3.75	0	80
P12.1	P12.2	P12.3	0	3.75	0	80
P13.1	P13.2	P13.3	0	3.75	0	80

3.6 Máquina de medição por coordenadas (CMM)

Para a avaliação da contracção volumétrica das peças obtidas no Desenho de Experiências foi necessário medir todas as dimensões destas para que fosse posteriormente comparado com as medições teóricas que se encontram no Anexo H. De acordo com o documento, existem 8 dimensões principais nesta peça: o diâmetro interior na zona dos terminais (KPC1), a espessura do

corte na secção C (QCI3), o comprimento da peça (QCI4), o diâmetro exterior do corte na secção C (QCI6), a energia mínima que a peça deve suportar (QCI9), a massa mínima da peça (QCI10), o diâmetro exterior da base da peça (QCI11) e o comprimento da torre (QCI12). Para a medição das peças a empresa utiliza uma máquina de medição por coordenadas (CMM), que consiste num dispositivo com seis graus de liberdade que mede as características geométricas físicas de um objecto e apresenta os seus resultados na forma matemática, podendo ser controlado por um operador ou por computador.

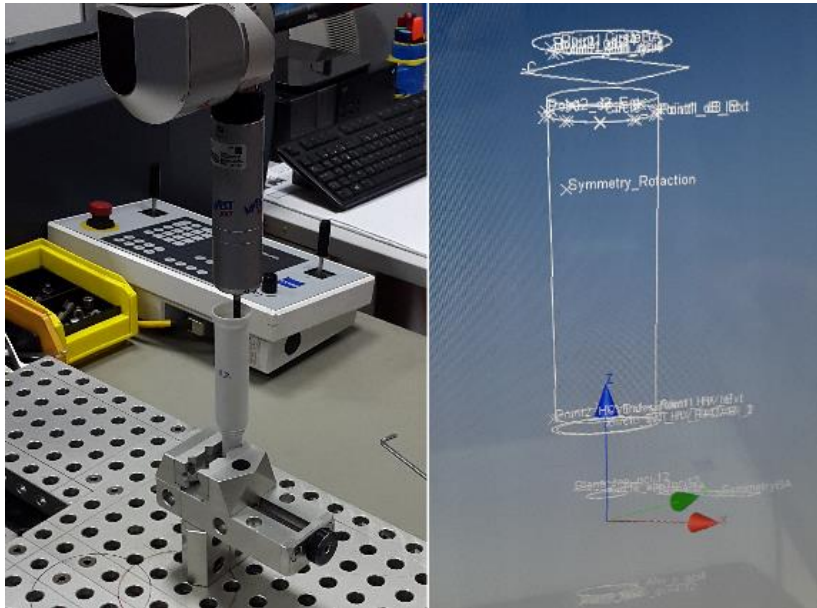


Figura 3.17: Medição das dimensões no interior da peça (à esquerda) e software utilizado pela CMM (à direita)

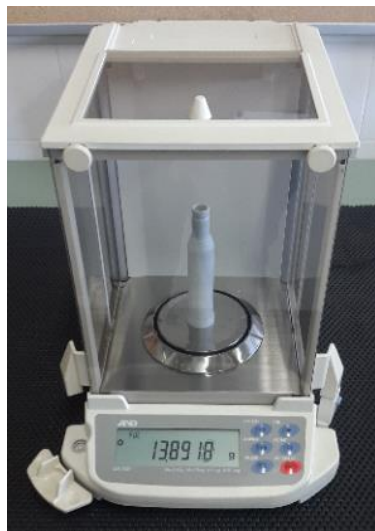


Figura 3.18: Balança de precisão utilizada

A CMM utilizada é controlada por computador com o *software Zeiss Calypso version 464*, utiliza 3 apalpadores para proceder às medições (um para o interior da peça e dois para o exterior) com uma incerteza de 3 μm e com sistema de coordenadas cartesiano (Figura 3.17). Foram obtidas 6 das 8 dimensões mencionadas anteriormente nesta máquina sendo que a espessura do corte na secção C é medida quatro vezes (QCI3_1, QCI3_2, QCI3_3 e QCI3_4), cada uma delas espaçada a 45° ao que foi feita uma média a fim de se obter os valores dos QCI3. As duas dimensões em falta foram a energia (QCI9) e a massa (QCI10) sendo a que a primeira será medida no teste de resistência mecânica que será falado no tópico seguinte. Em relação à segunda foi utilizada uma balança de precisão para medir a massa das peças (Figura 3.18) e após a medição das 78 peças, três ficaram abaixo de 13,5 g (massa mínima). No Anexo I encontram-se as dimensões medidas nas peças das cavidades 12 e 13, respectivamente.

3.7 Teste de resistência mecânica (*Ball Test*)

Juntamente com a contracção volumétrica e a massa, pretende-se avaliar a força na rotura (F_b), o deslocamento na rotura (S_b), a força máxima (F_{max}) e o trabalho (W) das peças com a alteração dos parâmetros de pressurização. Assim, é necessário submeter as 78 peças ao teste mecânico utilizado pela empresa a fim de se obter um gráfico força-deslocamento e serem registadas as 4 dimensões mencionadas anteriormente. O teste utilizado é denominado de *Ball Test* que utiliza uma máquina versátil com duas células de carga onde é possível realizar ensaios tanto de tracção como de compressão. Este teste, apesar de ser utilizado na empresa como o único teste de resistência mecânica aos seus componentes, não contém documentação interna sobre o seu procedimento experimental. A explicação que se segue tem em conta o procedimento realizado, observado e transmitido pelos operadores.

No *Ball Test* a peça é colocada na vertical com a secção da peça com menor diâmetro fixa num suporte e com a secção com maior diâmetro virada para cima. Após a fixação da peça inicia-se o teste, no qual um punção em aço 1.2344 com revestimento *Balinit* e que contém, na extremidade, uma esfera de diâmetro 21,6 mm (Anexo J) inicia um movimento rápido descendente de cerca de 40 mm (distância que permite à esfera entrar no interior da peça sem entrar em contacto com esta). Esta medida é previamente definida consoante a geometria da peça que irá ser medida. Nesse ponto o punção pára por uns instantes e depois inicia um movimento lento. Após entrar em contacto com a peça, percorre cerca de 46 mm até ocorrer a rotura da peça. Finalmente, o punção recua voltando ao ponto inicial com um movimento ascendente rápido. O teste está então terminado e a peça pode ser retirada do suporte. Toda a experiência é monitorizada num computador através do *software Zwick Roell testXpert V12.3 Master* que traça um gráfico dos valores da força em função da distância percorrida pelo punção e cria um ficheiro de dados numa directoria previamente definida.

Este teste, de resistência mecânica, está ilustrado na Figura 3.19. Devido ao gráfico obtido se apresentar numa forma de difícil visualização, foi criado um programa no *software Matlab* capaz de gerar um gráfico com muito melhor qualidade, a partir do ficheiro de dados gravado durante os ensaios (Anexo B). Um exemplo da comparação dos dois gráficos pode ser observado na Figura 3.20.

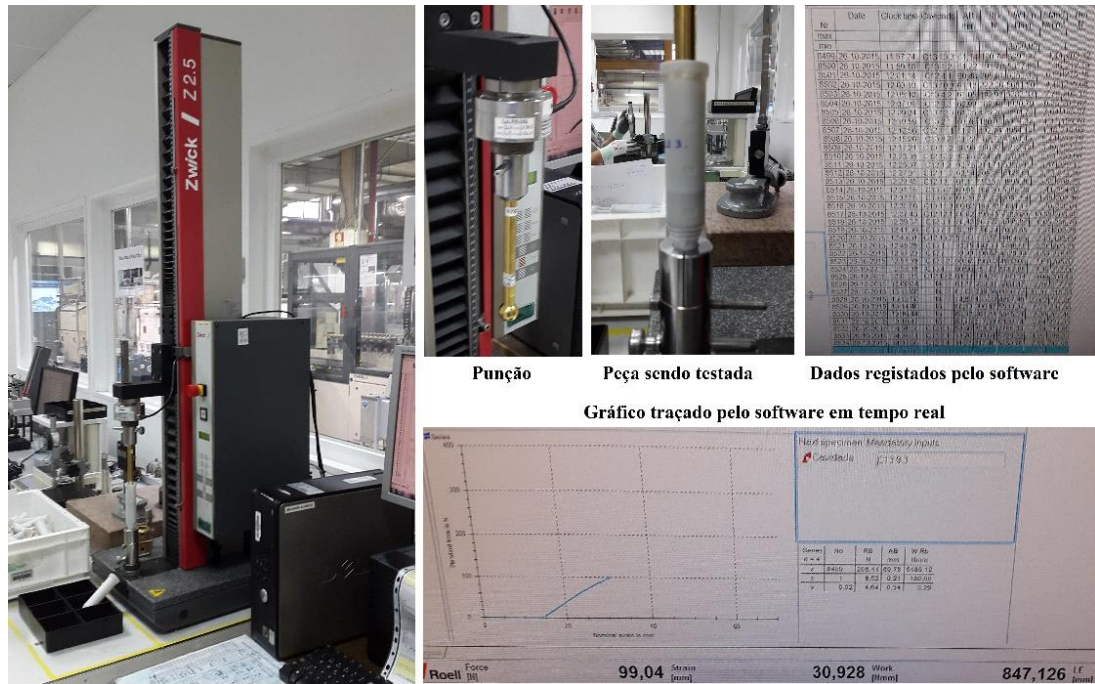


Figura 3.19: Ball test

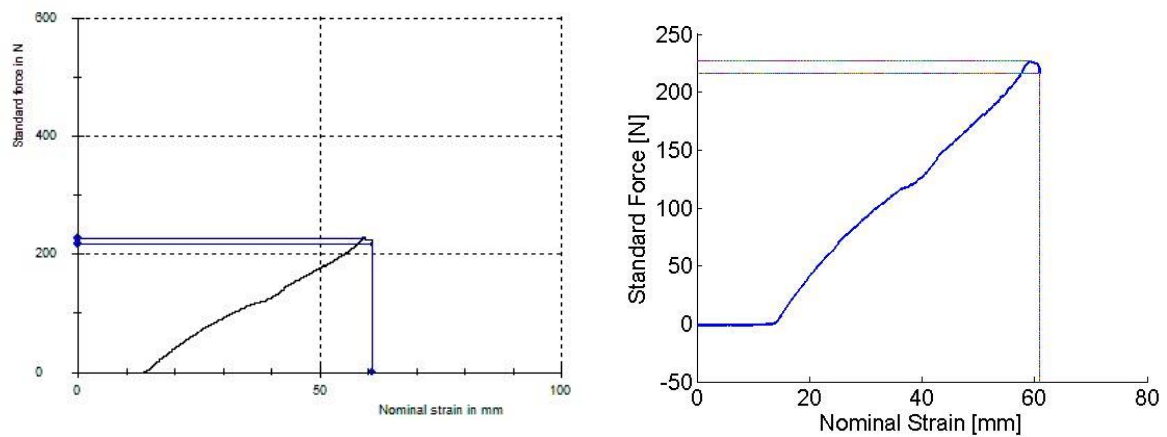


Figura 3.20: Comparação do gráfico dado pela máquina do Ball Test (à esquerda) e o gráfico gerado pelo Matlab (à direita) pertencente à peça da quarta experiência (2ª réplica) da cavidade 12

Tal como está representado no desenho 2D da peça (Anexo H), a peça tem uma ligeira inclinação ao longo do seu comprimento para facilitar a extracção do molde após ser produzida e é este ângulo (inferior a 1°) que permite ao punção testar a tenacidade da peça e levar à sua rotura.

Após executar o *Ball test* às 78 peças foi feita uma inspecção a cada uma delas a fim de apurar a zona onde ocorre a rotura. Nas peças da cavidade 12, 3 delas tiveram a rotura na linha de soldadura e as restantes 36 na zona dos três castelos (Figura 3.21 em cima), enquanto no caso da cavidade 13, todas as 39 peças têm a linha de rotura na zona dos 2 castelos onde se encontra a indicação do número da cavidade (Figura 3.21 em baixo). De notar que em ambas as cavidades as peças partem do mesmo lado do molde.

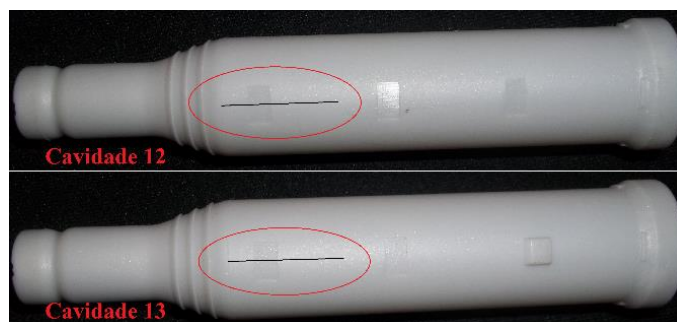


Figura 3.21: Representação da zona de rotura em ambas as cavidades

3.8 Simulação

A simulação do processo de injeção por moldação do molde descrito anteriormente para a produção das *cases* das bobinas de ignição foi realizada no programa *Moldex3D*. Para proceder à realização desta simulação foi necessário reunir vários componentes, parâmetros e dimensões que fazem com que o processo se torne o mais realista possível, estando estes descritos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Elementos necessários à execução da simulação

<i>Moldex 3D</i>	
<i>Sistema CAD</i>	<i>Simulação</i>
-Peça (case) modelada em formato STL ¹	-Tipo de aço das zonas moldantes
-Canais de alimentação modelados em formato STL/ linhas de centro em formato STEP ² ou IGES ³	-Tempo de injeção
-Canais de refrigeração modelados em formato STL/ linhas de centro em formato STEP ou IGES	-Tempo de compactação (pós-pressão)
- <i>Moldbase</i> (dimensões exteriores do molde)	-Temperatura do material a injectar
	-Temperatura do molde
	-Tempo de arrefecimento
	-Referência do polímero injectado

¹ *STereoLithography*

² *STandard for the EXchange of Product model data*

³ *Initial Graphics EXchange Specification*

3.8.1 SolidWorks

Para a criação e edição dos componentes foi utilizado o programa de modelação *SolidWorks*.

- **Molde**

O molde de referência *N55 Case#6 PLT461* modelado foi disponibilizado pela empresa em formato STEP sendo possível observá-lo orientado para o lado da injeção do material (Figura 3.22) e extracção da peça (Figura 3.23). Na Figura 3.24, as duas metades do molde encontram-se separadas e são focadas as duas peças produzidas em cada ciclo com a posição na qual se encontram. Com o molde é possível criar o *Moldbase* que corresponde às superfícies exteriores do bloco de aço onde estão inseridos os canais de alimentação, os canais de refrigeração e as peças sendo apenas necessário registar as dimensões deste a partir da modelação.

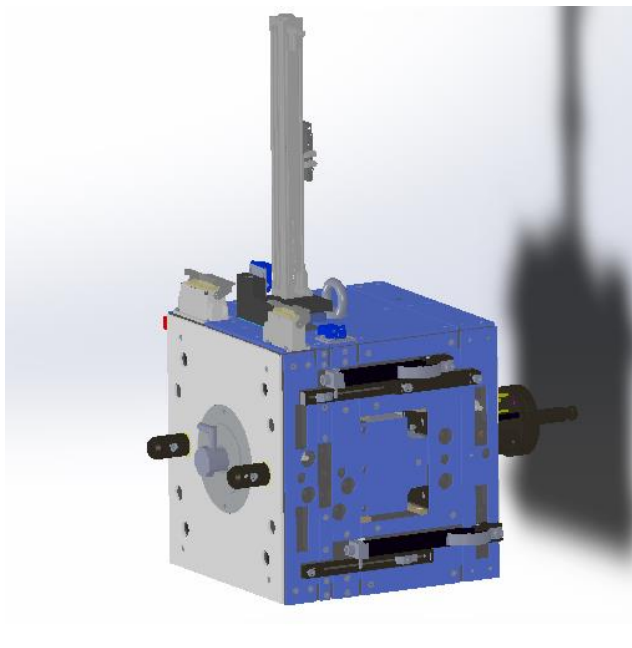


Figura 3.22: Molde modelado com vista para o lado da injeção

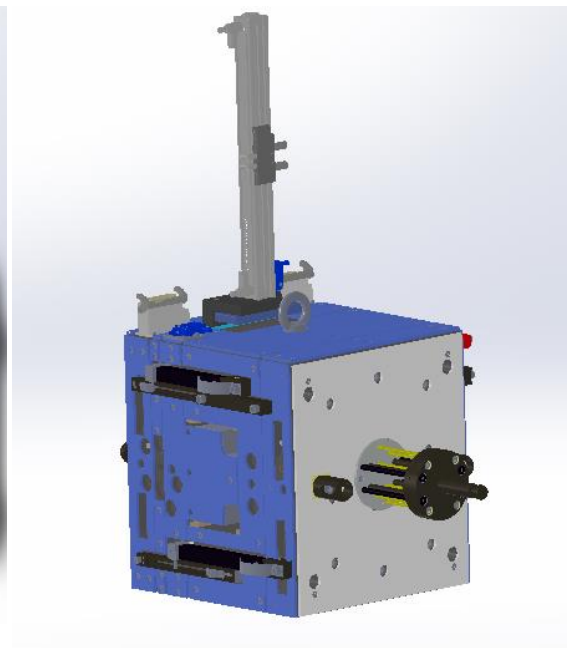


Figura 3.23: Molde modelado com vista para o lado da extracção

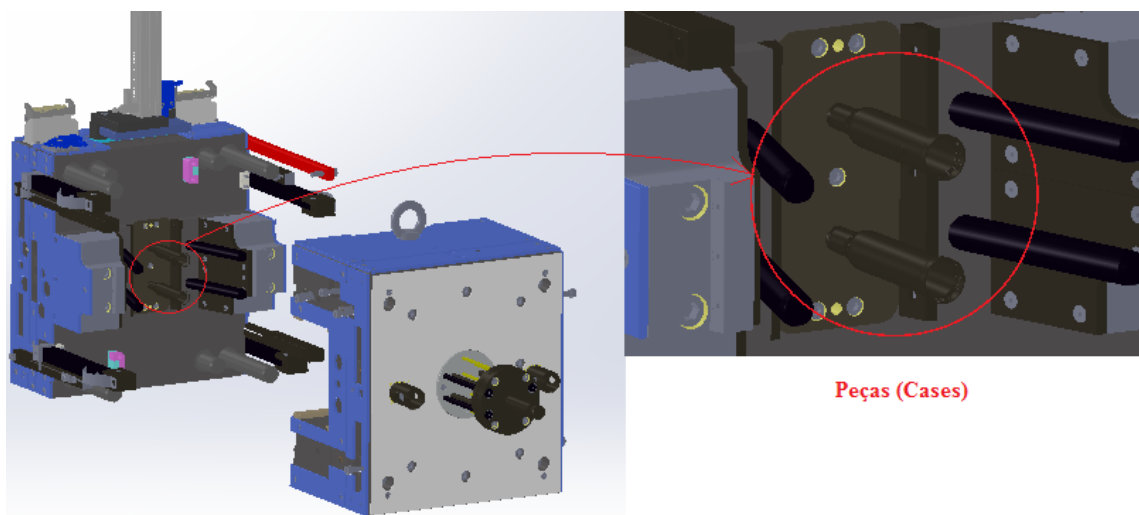


Figura 3.24: Molde modelado aberto com as peças injectadas no interior

- **Canais de Alimentação**

Os canais de alimentação encontram-se no interior da metade fixa do molde correspondente à parte da injeção. Estando já estes modelados, foi apenas necessário gravar estes componentes no formato adequado (STL). Na Figura 3.25 encontram-se estes canais com a orientação à qual se encontram no molde e é possível observar que para cada peça são utilizados dois pontos de injeção.

- **Peças**

As peças já observadas anteriormente no interior do molde encontram-se modeladas e foi gravado também em formato STL com a orientação e a distância entre elas tal como são injectadas para posteriormente serem colocadas no *software* de simulação nas posições correctas (**Figura 3.26**).

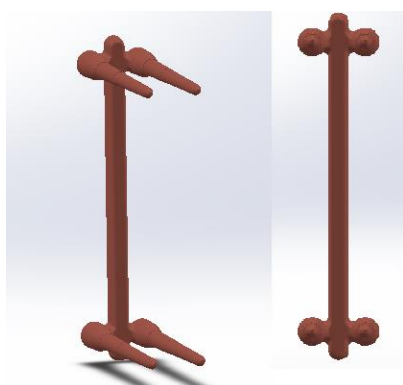


Figura 3.25: Canais de alimentação modelados



Figura 3.26: Peça modelada

Na Figura 3.27 a peça encontra-se na vista de topo ao qual é possível observar as duas ligações entre a peça e os canais de alimentação que corresponde aos 2 pontos de injeção. São estas duas ligações que são quebradas antes da extracção para assim separar as peças dos canais visto que o molde é de três placas e utiliza um sistema de canais frios. As peças e os canais de alimentação como um só elemento, ou seja, como são injectadas e antes da extracção, encontram-se representadas na Figura 3.28. De referir que os canais e as peças são colocados em separado no *Moldex 3D* e portanto gravados como ficheiros diferentes e não como se encontram nessas figuras.



Figura 3.27: Localização dos pontos de injeção

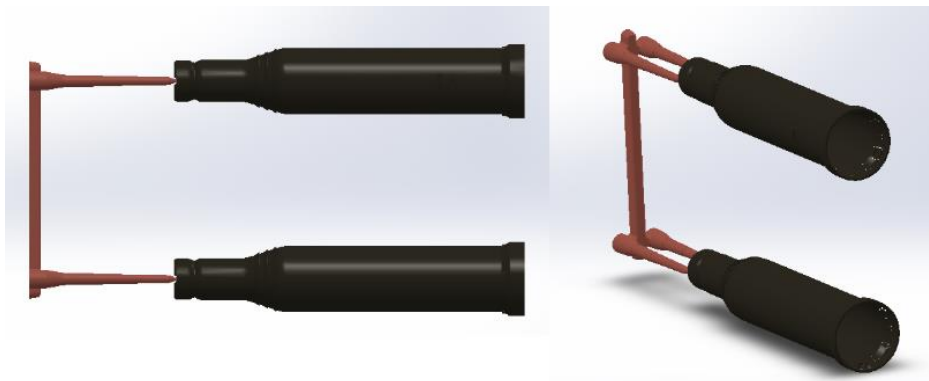


Figura 3.28: Peças com canais de alimentação modelados

- ***Canais de Refrigeração***

No caso dos canais de refrigeração, foi necessário proceder à sua modelação porque não foi possível obtê-los directamente no molde, tal como nos casos anteriores. Foram então modeladas as linhas de centro dos canais (coincidentes com os seus eixos de revolução por serem cilíndricos) tendo em conta o ficheiro do molde para a correcta localização dos canais. Foram apenas desenhadas as linhas relevantes à refrigeração do molde, ou seja, o caminho que a água percorre não sendo desenhadas aquelas que levam aos tampões de vedação, como é mostrado na Figura

3.29. Os tampões são utilizados para garantir a vedação do circuito enquanto os tacos servem para criar desvios de percurso do fluido de refrigeração. Na Figura 3.30 é possível observar todas as linhas de centro desenhadas que constituem o sistema de refrigeração do molde. Este ficheiro foi então gravado no formato IGES para inserir posteriormente no *software* de simulação (*Moldex 3D*) onde se criaram os canais com o diâmetro real (10 mm).

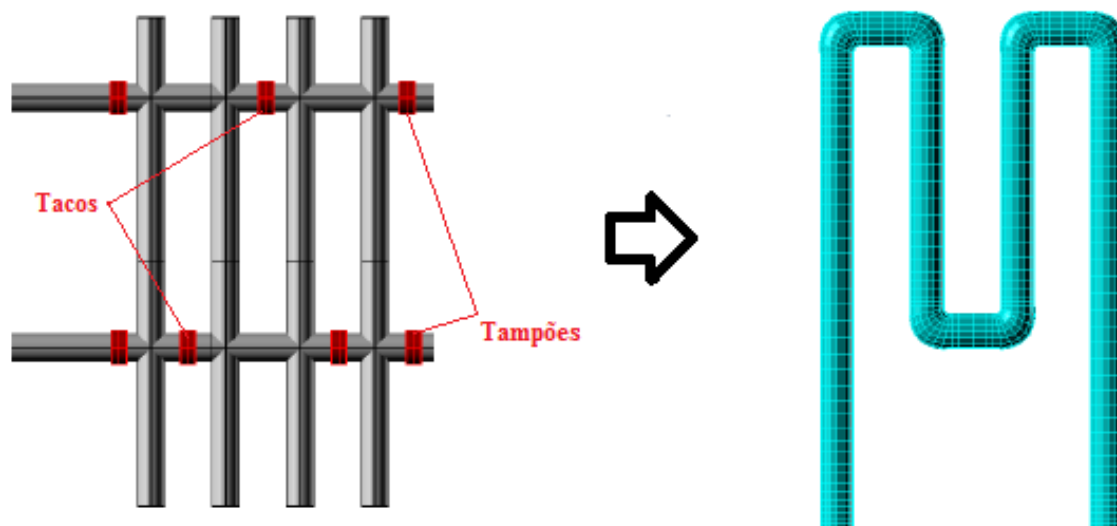


Figura 3.29: Canais como se encontram no molde (esquerda) e como devem estar no Moldex3D (direita)

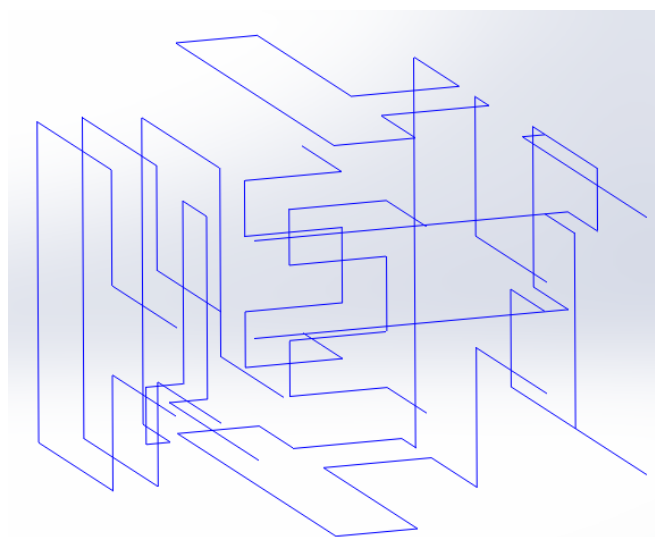


Figura 3.30: Linhas de centro modeladas dos canais de refrigeração

- **Conjunto**

Nas imagens seguintes estão representados os 3 componentes modelados necessários para a simulação: canais de alimentação, peças e canais de refrigeração. Os canais de alimentação foram

criados apenas para demonstração sendo que para o programa de simulação são importadas as linhas de centro como já foi referido anteriormente. Estes encontram-se nas mesmas posições que no caso real e é importante que os três componentes tenham o mesmo sistema de eixos e referentes à mesma origem para que quando forem importados para o programa de simulação se encontrarem nas posições correctas tal como é visto na *Figura 3.31*.

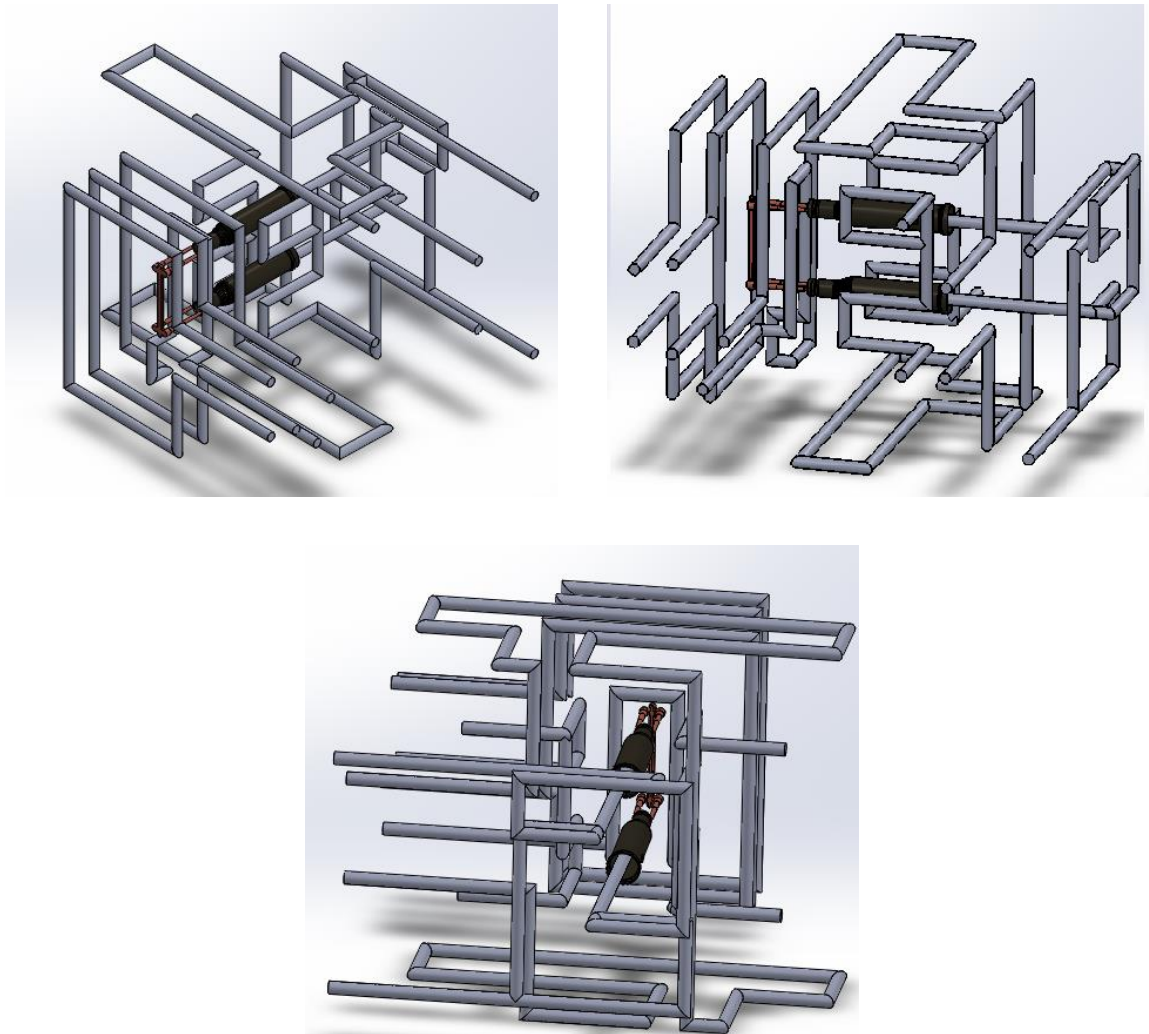


Figura 3.31: Conjunto dos elementos modelados

3.8.2 Moldex 3D

Tendo todos os componentes modelados em *software* CAD e gravados nos respectivos formatos é possível então proceder à simulação do processo de injeção por moldação das *cases* utilizando o *software* *Moldex 3D*. Pretende-se realizar um teste completo, ou seja, uma análise de enchimento, compactação, refrigeração e empeno.

Foram importadas inicialmente as peças e os canais de alimentação em formato STL para o programa de simulação e criado o ponto de entrada de material (ponto por onde entra o material plástico, na interface com a máquina de injeção) que é um cone truncado com diâmetro de base com cerca de 8 mm, sendo que a sua forma e localização podem ser observadas na Figura 3.32 e Figura 3.33.

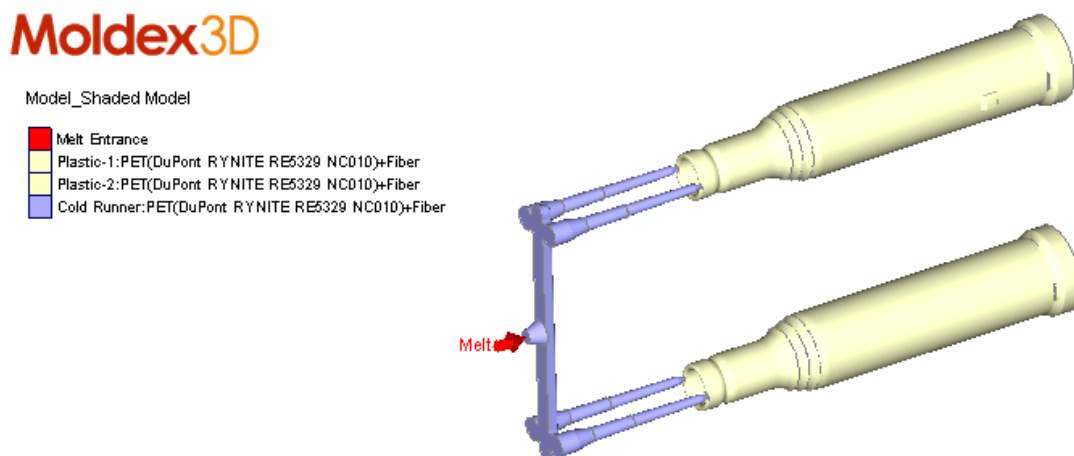


Figura 3.32: Peças com sistema de alimentação

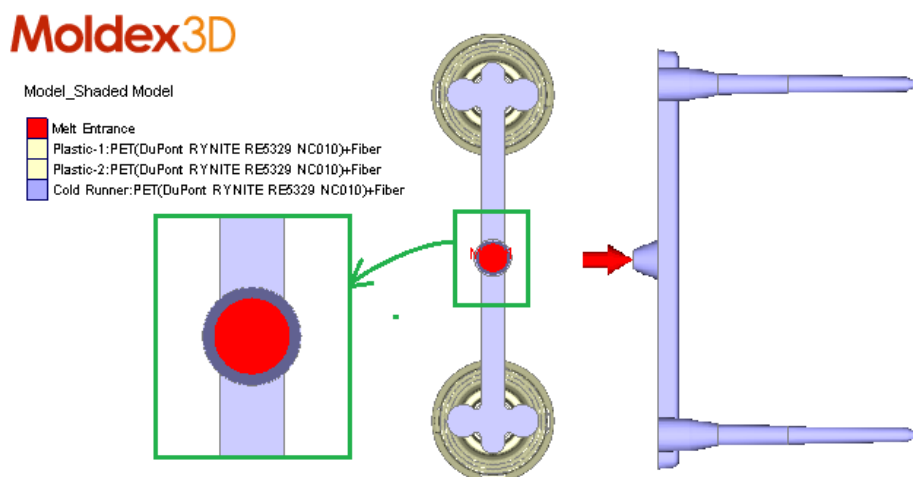


Figura 3.33: Canais de alimentação com pormenor da entrada de material

Em seguida importaram-se os ficheiros correspondentes aos canais de refrigeração em formato IGES (Figura 3.34). Com o recurso aos desenhos do molde, disponibilizados pela empresa, foram então determinadas as entradas e saídas da água nos canais.

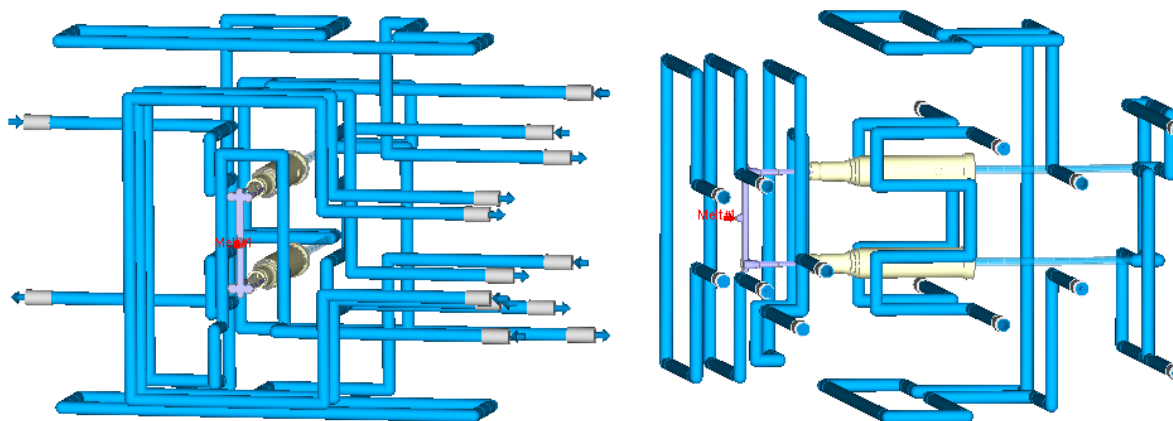


Figura 3.34: Canais de refrigeração com indicação das entradas e saídas da água

O *software* utilizado permite realizar o teste dos circuitos de refrigeração para detectar possíveis erros de *layout*. Efectuado este teste (*check cooling channel*), detectou-se uma inconsistência relativa à refrigeração no interior das buchas, o que indicou não terem sido seleccionadas as configurações mais correctas. Neste caso, é utilizada uma refrigeração do tipo cascata, na qual a água entra através de um canal inserido na bucha, passa no intervalo compreendido entre esse canal e a bucha, seguindo depois um canal de saída, tal como é esquematizado na Figura 3.36 e Figura 3.35.

Para esses dois canais no interior das buchas foi então seleccionado o comando “*bubbler*” referente ao tipo de configuração em cascata dando as referidas dimensões dos diâmetros das buchas e canais assim como a distância entre os respectivos topos (Figura 3.37).

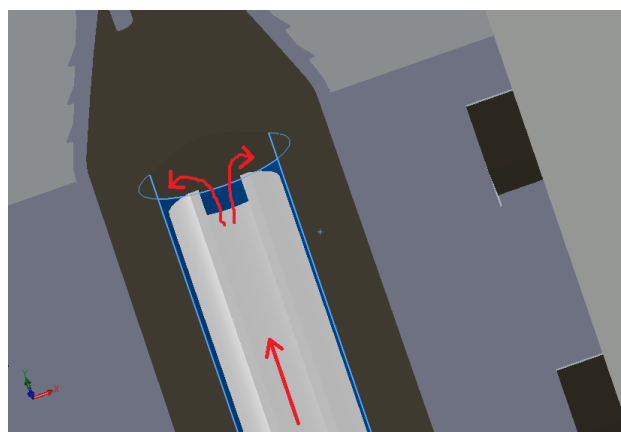


Figura 3.35: Direcção da água à saída da bucha (em cascata)

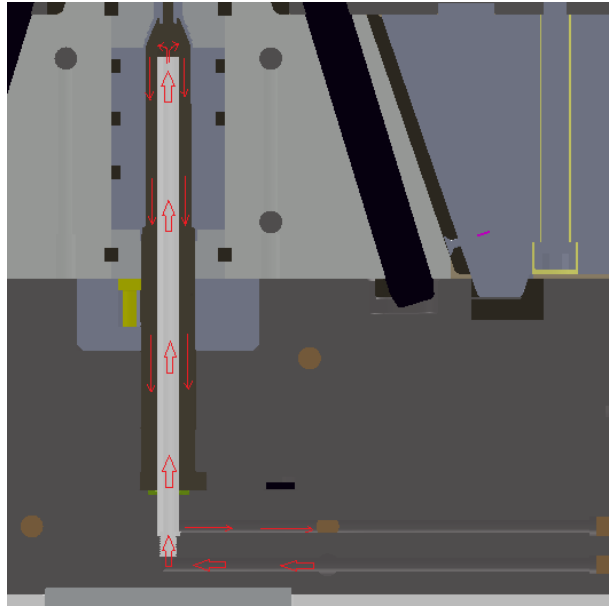


Figura 3.36: *Circulação da água numa das buchas do molde*

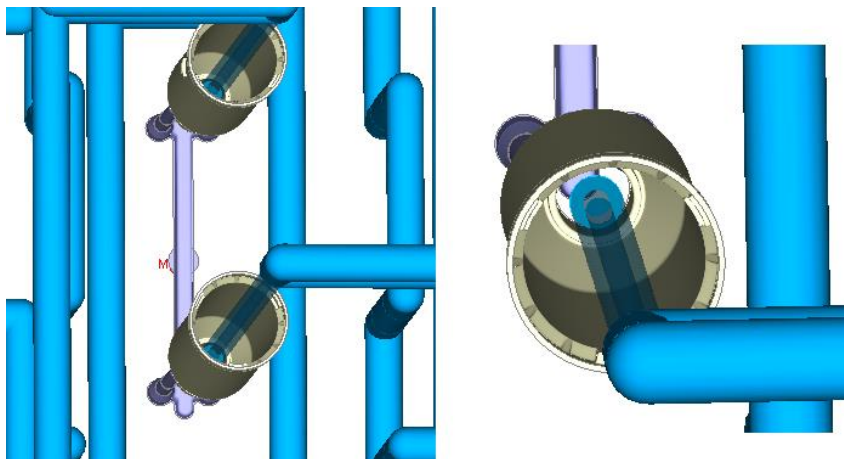


Figura 3.37: *Refrigeração em cascata no interior das buchas no Moldex3D*

Depois de serem inseridos os componentes modelados no *software* CAD foi criado o *moldbase* (Figura 3.38), que como já foi referido anteriormente corresponde às superfícies exteriores do bloco de aço do molde onde estão inseridos os canais de alimentação, os canais de refrigeração e as peças, sendo para isso necessário introduzir as três dimensões principais (comprimento, altura e profundidade).

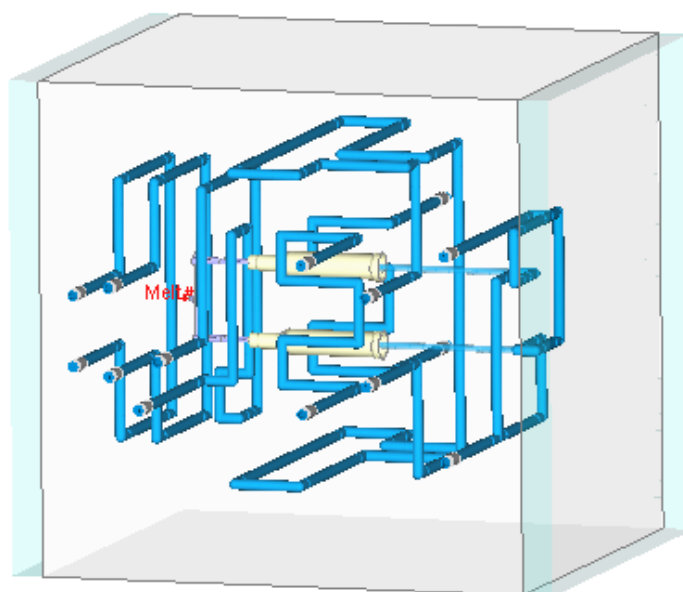


Figura 3.38: Moldbase no Moldex3D

O passo seguinte foi a geração da malha mais adequada. Visto ser recomendável a utilização de uma malha mais refinada quando se pretende efectuar a análise de refrigeração e empeno, foi seleccionado o nível máximo de refinamento da malha possível neste *software* (nível 5 numa escala de 1-5). Estando a parte da modelação concluída foram criadas as condições de processamento pretendidas e que se mantêm constantes em todos os ensaios realizados. Estas foram inseridas tendo em conta os resultados provenientes da preparação do molde e encontram-se na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Condições de processamento

<i>Tempo de injeção</i>	0,5 s
<i>Tempo de compactação (pós-pressão)</i>	4 s
<i>Temperatura do material a injectar</i>	285 °C
<i>Temperatura do molde</i>	140 °C
<i>Tempo de arrefecimento</i>	8 s
<i>Referência do polímero injectado</i>	PET – DuPont Rynite 5329 NC010
<i>Tipo de aço das zonas moldantes</i>	1.2344

Apresentação e Discussão de Resultados

Os resultados obtidos na componente experimental da presente dissertação serão apresentados e discutidos neste capítulo.

Para análise dos resultados do planeamento de experiências realizou-se, em primeiro lugar, a análise das respostas médias à razão sinal-ruído e ao declive da recta. No entanto, esta análise revelou-se inconclusiva e os resultados não permitiram identificar os melhores níveis dos factores, nem os factores significativos, quando comparando os efeitos de todos os factores. Desta forma, optou-se por não apresentar estes resultados, e realizou-se apenas a análise através da metodologia de superfície de resposta.

Os resultados obtidos pela preparação do molde serão apresentados e comparados com os resultados da metodologia de superfície de resposta e simulação do processo de injeção da *case N55* efectuada no *software Moldex3D*. As respostas obtidas pelo Desenho de Experiências efectuado serão comparadas com as respectivas simulações realizadas no *Moldex3D*.

4.1 Resultados da preparação do molde

Neste ponto serão apresentados os resultados do procedimento experimental relativamente à preparação do molde *PLT461* que ficarão registados na folha de *setup* para um maior conhecimento sobre este processo em concreto e que poderá servir de suporte na resolução de algum problema que surja durante a produção das *cases N55*. No caso dos estudos que nos dão parâmetros de processo, esses serão colocados como *inputs* na máquina e controlados segundo uma gama em torno desses valores. Os resultados dos 6 estudos podem ser vistos na Tabela 4.1. Para o preenchimento dos *inputs* e *outputs* utilizados no processo localizados na parte da frente da folha de *setup* foi ainda criado um documento que pode servir como auxílio ao responsável dessa tarefa e que contém descrições de informações, regras e avisos referentes a alguns parâmetros das máquinas antigas (CC100) e das máquinas recentes (CC200), como é o caso da utilizada neste trabalho. Este documento pode ser consultado no Anexo C. Foi criado um pequeno guia de resolução de problemas no qual se indicam que procedimentos devem ser realizados no caso de aparecimento de

alguns dos defeitos mais comuns que surgem nas peças tendo em conta a experiência nos moldes semelhantes no caso de algum parâmetro ter algum valor fora dos valores de referência.

Tabela 4.1: Resultados dos 6 estudos

<i>Estudo</i>	<i>Outputs</i>
<i>Estudo da viscosidade</i>	Velocidade de injeção = 75 mm/s Curso de comutação (C3) = 11 mm Curso do fuso (C1) = 43 mm Volume de dosagem (VS) = C1-C3 = 32 mm
<i>Estudo do balanceamento das cavidades</i>	Desvio massa médias entre peças cav12 e cav13 < 2%
<i>Estudo da queda de pressão</i>	Pressão de injeção = 119.2 bar Maior queda de pressão entre os 15 e 75% de enchimento das peças (39.70% = 32.6 bar)
<i>Estudo da janela de processo</i>	Temperatura do molde = 140 °C Pós-pressão = 80 bar com a gama [70;90] bar
<i>Estudo da solidificação do ponto de injeção</i>	Tempo de pós-pressão = 4 s (mínimo)
<i>Estudo do tempo de arrefecimento</i>	Tempo de arrefecimento = 8 s

Na folha de *setup* existe ainda um gráfico, que representa os principais parâmetros de processo, que não pertence aos estudos efectuados. No gráfico está representada a variação da pressão em função do tempo e do curso do fuso tendo as curvas um comportamento teórico (ideal). Este gráfico pode ser visto na Figura 4.1. As duas curvas correspondem ao comportamento mínimo e máximo que a curva real deve ter, curva esta que pode ser observada na máquina ao longo da produção. O objectivo é obter um gráfico real o mais parecido possível com o ideal, mantendo-o dentro desse intervalo de curvas (mínimo e máximo). Este gráfico tem início na injeção do polímero e termina após o tempo de arrefecimento da peça (Z4x), antes da abertura do molde, estando no entanto registado o tempo de total de ciclo coincidente com este, representado por ZUs. A fase de injeção é representada por uma recta com o seu fim no pico de pressão de injeção (PVs). A comutação é instantânea no gráfico ideal (PVs = PHu), situação que não se verifica na curva real pois existe sempre algum atraso na comutação no qual a máquina transita da fase de enchimento para a fase de compactação. O tempo de injeção (ZSx) decorre entre C1 (curso do fuso) e C3 (curso de comutação). Na transição da fase de injeção para a pós-pressão (comutação),

a pressão baixa e inicia-se o perfil de pressão em rampa com o fuso a ter um deslocamento correspondente à almofada (CPx) durante o tempo de pós-pressão (Z2x). Após a fase de pressurização inicia-se a refrigeração da peça (pressão baixa para zero) ocorrendo também nesta fase a dosagem de material fazendo com que o fuso tenha o volume de dosagem (VSx) definido para que no próximo ciclo este volume possa ser utilizado na fase de injeção e pós-pressão. Este volume, que ocorre durante o tempo de dosagem (ZDx), corresponde então em termos matemáticos a C1-C3 estando já incluídas nessa diferença a contracção volumétrica do material e a almofada. Como já foi descrito anteriormente no caso de bicos abertos ocorre uma descompressão (C4/C2, com um curso de 5 mm) após a dosagem e é por isso que o curso total de dosagem (SSx) encontra-se na posição 48 mm (43+5). Quando ocorre a comutação, a pressão baixa para o valor de pós-pressão e permanece constante até ao fim desta fase. Depois de finalizado, a pressão hidráulica baixa para zero e dá-se início ao arrefecimento da peça e a dosagem de material para o ciclo seguinte, sendo os seus tempos Z4x e ZDx, respectivamente.

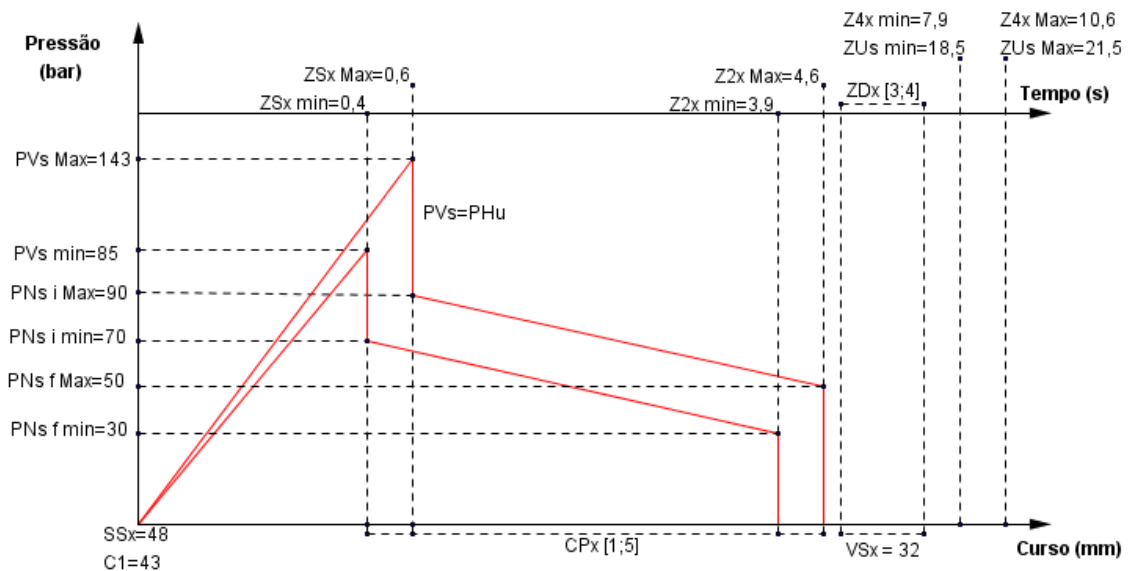


Figura 4.1: Gráfico de injeção

A folha de *setup*, referente ao molde *PLT461* que produz *cases N55*, preenchida com os dados de *input*, *output* do processo e resultados de validação encontram-se no Anexo L.

4.2 Resultados da metodologia de superfície de resposta

Os parâmetros de processo em estudo analisados foram os parâmetros relativos à fase de pressurização, nomeadamente o tempo e a pressão. Para análise dos resultados utilizou-se a metodologia de superfície de resposta, com o planeamento de experiências definido no ponto 3.6 (Tabela 3.10).

A adequação dos modelos de resposta foi testada com intervalo de confiança de 95% pela razão F do conjunto de ensaios, utilizando o *software STATISTICA*. Foi ainda realizada a análise da normalidade da distribuição dos resíduos, a análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo e aos valores observados nas experiências, para verificar a existência de outros factores a influenciar as respostas e a consistência do modelo.

Em primeiro lugar avaliaram-se as características obtidas através do teste de resistência Mecânica (*Ball Test*), nomeadamente a força na rotura (F_b), o deslocamento na rotura (S_b), a força máxima (F_{max}) e o trabalho (W) das peças com a alteração dos parâmetros de pressurização. Construídas as respectivas tabelas ANOVA, verificou-se que nenhuma das variáveis da fase de pressurização se mostrou significativa em qualquer das respostas.

No que diz respeito à contracção volumétrica das peças obtidas avaliaram-se as seguintes respostas:

- Diâmetro interior na zona dos terminais (KPC1);
- Espessura do corte na secção C (QCI3);
- Comprimento da peça (QCI4);
- Diâmetro exterior do corte na secção C (QCI6);
- Diâmetro exterior da base da peça (QCI11);
- Comprimento da torre (QCI12);
- Massa (QCI10).

4.2.1 Diâmetro interior na zona dos terminais (KPC1)

Factor	ANOVA Variável KPC1 $R^2 = 0.71009$				
	SS	g.l.	MS	F	p
<i>t</i> (L)	0.000002	1	0.000002	0.43203	0.515554
<i>t</i> (Q)	0.000299	1	0.000299	64.85834	0.000000
<i>P</i> (L)	0.000061	1	0.000061	13.15488	0.000957
<i>P</i> (Q)	0.000000	1	0.000000	0.01789	0.894399
<i>t x P</i>	0.000007	1	0.000007	1.52773	0.225180
<i>Erro</i>	0.000152	33	0.000005		
<i>Total SS</i>	0.000526	38			

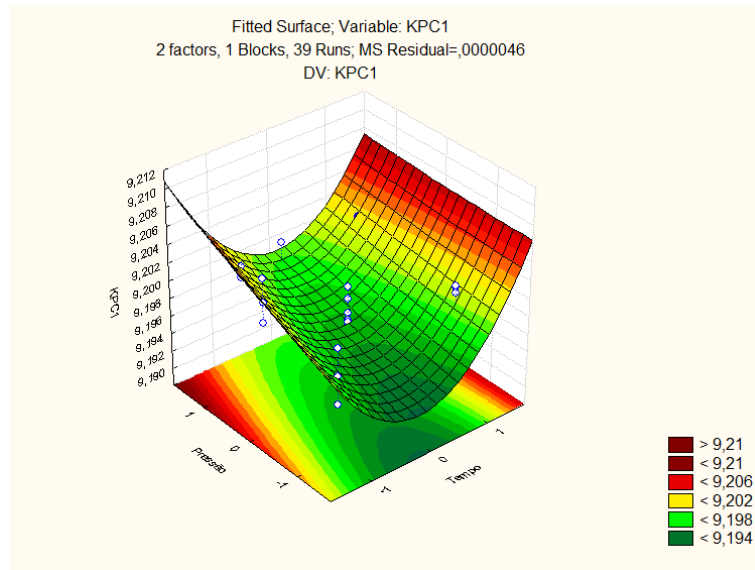


Figura 4.2: Superfície de resposta de $KPC1 = f(t, P)$

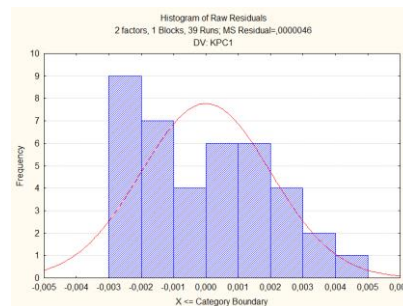


Figura 4.3: Histograma de resíduos (KPC1)

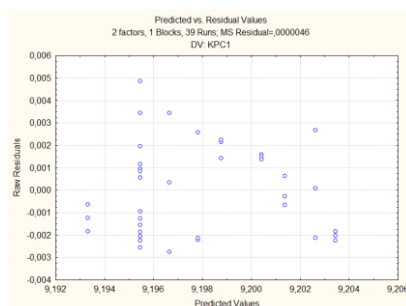


Figura 4.4: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (KPC1)

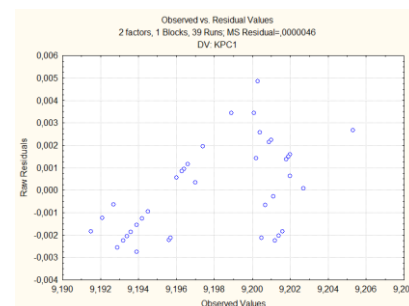


Figura 4.5: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (KPC1)

A partir da análise realizada pode observar-se o seguinte, relativamente ao diâmetro interior na zona dos terminais (KPC1):

- A distribuição normal dos resíduos e a sua aleatoriedade face aos valores previstos e observados, conduz à verificação de que não existem outros factores a influenciar significativamente a resposta;
- As variáveis que influenciam o diâmetro interior na zona dos terminais (KPC1) são o tempo (termo quadrático) e a pressão. No entanto, o efeito cruzado destas duas variáveis não é significativo.
- O valor de R^2 calculado é aceitável, o que indica adequação do modelo.

4.2.2 Espessura do corte na secção C (QCI3)

Factor	ANOVA Variável QCI3 $R^2 = 0.8073$				
	SS	g.l.	MS	F	p
$t(L)$	0.000001	1	0.000001	0.9299	0.341891
$t(Q)$	0.000001	1	0.000001	0.8351	0.367438
$P(L)$	0.000126	1	0.000126	134.5882	0.000000
$P(Q)$	0.000001	1	0.000001	1.4862	0.231453
$t \times P$	0.000001	1	0.000001	0.6624	0.421532
Erro	0.000031	33	0.000001		
Total SS	0.000160	38			

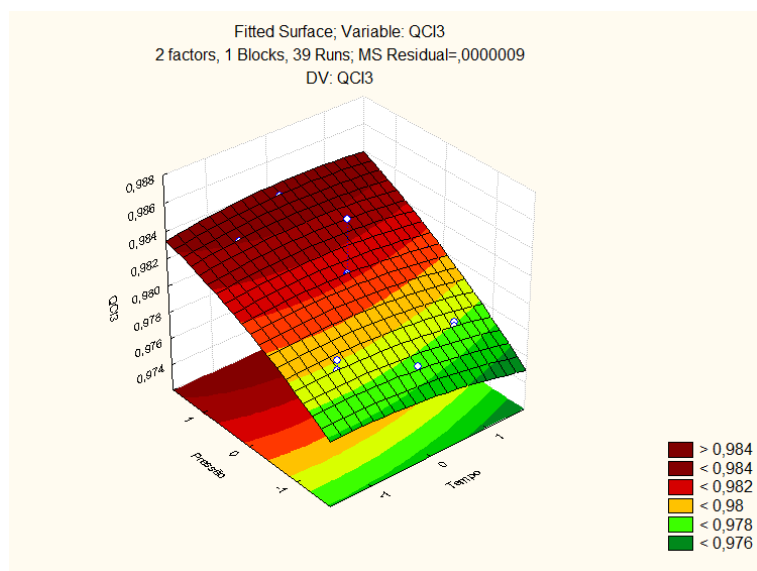


Figura 4.6: Superfície de resposta de $QCI3 = f(t, P)$

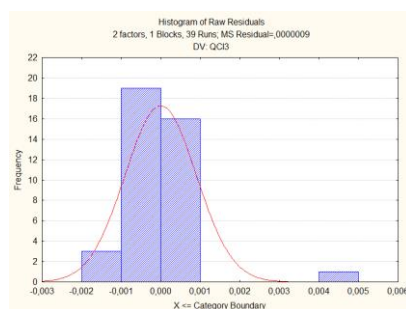


Figura 4.7: Histograma de resíduos (QCI3)

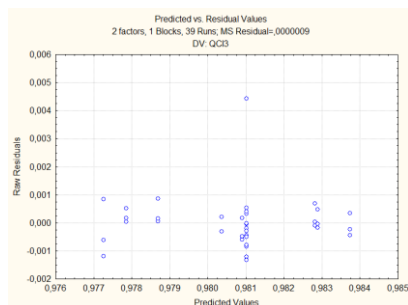


Figura 4.8: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI3)

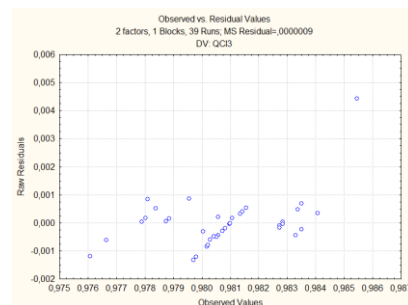


Figura 4.9: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI3)

No caso da dimensão QCI3 (espessura do corte na secção C), o termo mais significativo é o da pressão, o que indica ser esta a variável que influencia esta dimensão. No entanto, e apesar do valor de R^2 calculado ser elevado, o que indica adequação do modelo observou-se que a análise dos resíduos mostra alguma falta de ajuste do modelo.

4.2.3 Comprimento da peça (QCI4)

Factor	ANOVA Variável QCI4 $R^2 = 0.429$				
	SS	g.l.	MS	F	p
<i>t</i> (L)	0.000066	1	0.000066	0.84598	0.364368
<i>t</i> (Q)	0.000031	1	0.000031	0.39694	0.533012
<i>P</i> (L)	0.001571	1	0.001571	20.05824	0.000085
<i>P</i> (Q)	0.000271	1	0.000271	3.46114	0.071759
<i>t x P</i>	0.000022	1	0.000022	0.27585	0.602948
Erro	0.002584	33	0.000078		
Total SS	0.004526	38			

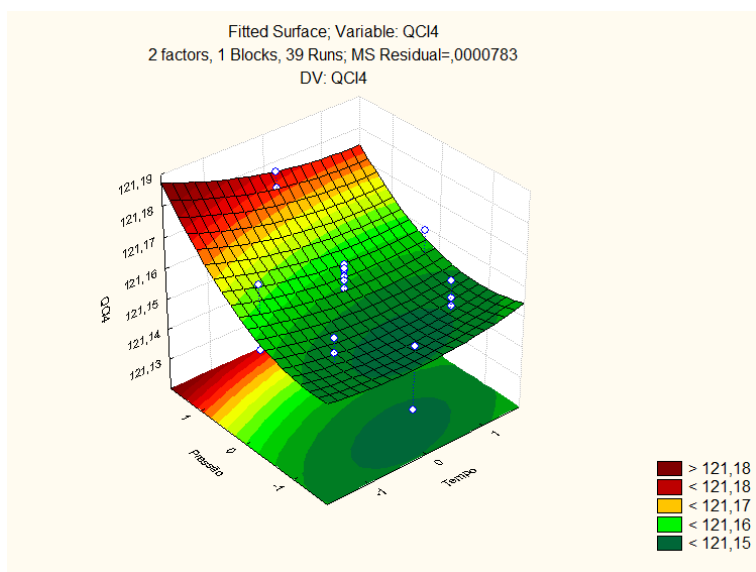


Figura 4.10: Superfície de resposta de $QCI4 = f(t, P)$

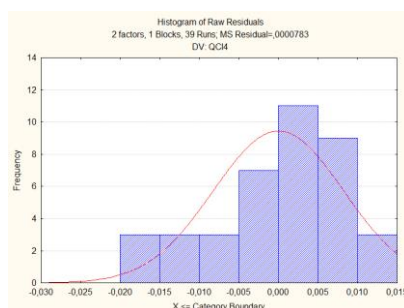


Figura 4.11: Histograma de resíduos (QCI4)

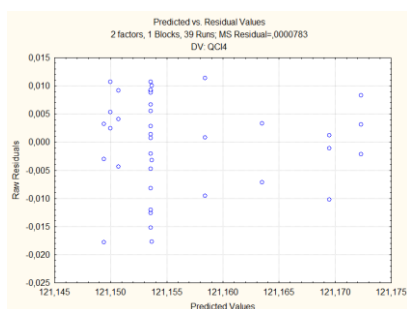


Figura 4.12: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI4)

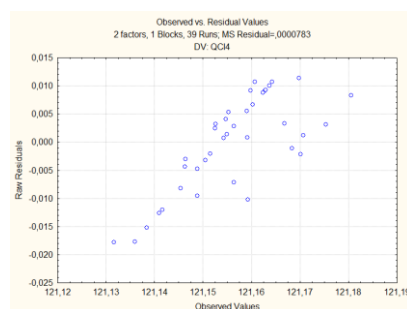


Figura 4.13: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI4)

O comprimento da peça (QCI4) é influenciado apenas pela pressão. O valor de R^2 calculado é baixo, o que indica pouca adequação do modelo. No que diz respeito à análise dos resíduos, observou-se um padrão de comportamento que não o aleatório o que mostra falta de ajuste do modelo.

4.2.4 Diâmetro exterior do corte na secção C (QCI6)

Factor	ANOVA Variável QCI6 $R^2 = 0.95431$				
	SS	g.l.	MS	F	p
<i>t</i> (L)	0.000000	1	0.000000	0.0077	0.930416
<i>t</i> (Q)	0.000003	1	0.000003	1.8460	0.18349
<i>P</i> (L)	0.001262	1	0.001262	683.3097	0.000000
<i>P</i> (Q)	0.000009	1	0.000009	4.8361	0.034985
<i>t</i> x <i>P</i>	0.000000	1	0.000000	0.0000	1.000000
<i>Erro</i>	0.000061	33	0.000002		
<i>Total SS</i>	0.001334	38			

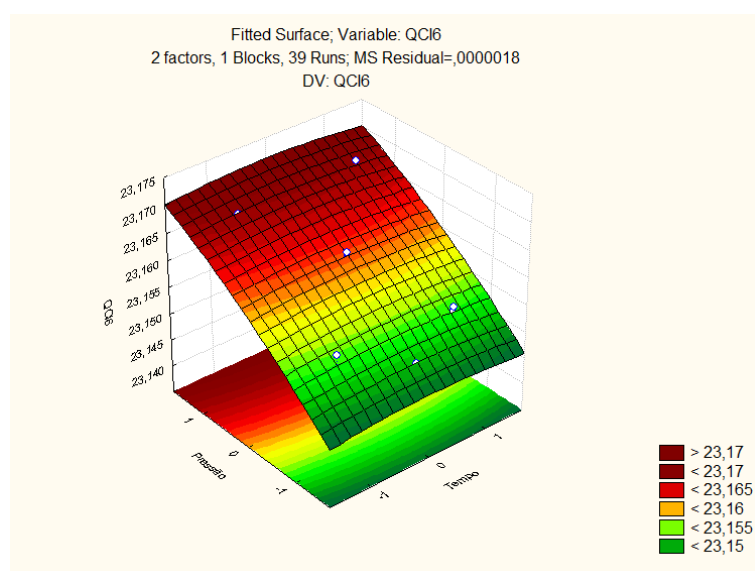


Figura 4.14: Superfície de resposta de $QCI6 = f(t, P)$

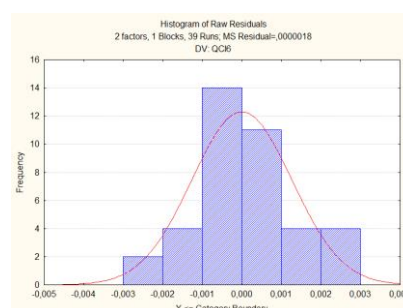


Figura 4.15: Histograma de resíduos (QCI6)

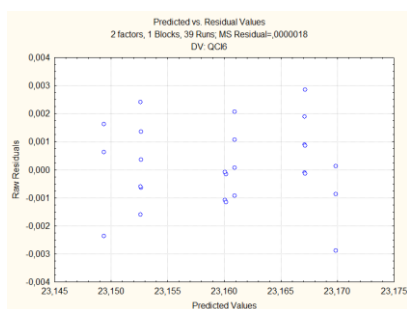


Figura 4.16: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI6)

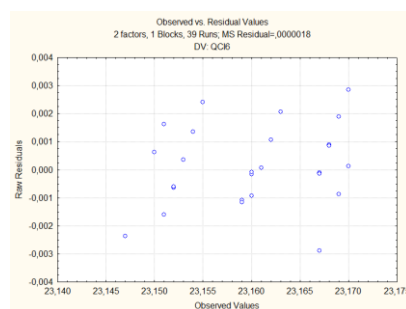


Figura 4.17: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI6)

A análise realizada para o diâmetro exterior do corte na secção C (QCI6) mostra que:

- O valor de R^2 elevado indica adequação do modelo;
- A distribuição normal dos resíduos e a sua aleatoriedade face aos valores previstos e observados, conduz à verificação de que não existem outros factores a influenciar a resposta;
- A única variável que influencia esta dimensão é a pressão (termo linear e quadrático).

4.2.5 Diâmetro exterior da base da peça (QCI11)

Factor	ANOVA Variável QCI11				
	$R^2 = 0.42637$				
	SS	g.l.	MS	F	p
t (L)	0.004669	1	0.004669	9.92888	0.003450
t (Q)	0.005118	1	0.005118	10.88434	0.002331
P (L)	0.000159	1	0.000159	0.33816	0.564843
P (Q)	0.000909	1	0.000909	1.93201	0.173845
t x P	0.000003	1	0.000003	0.00596	0.938922
Erro	0.015518	33	0.000470		
Total SS	0.027052	38			

No que diz respeito ao diâmetro exterior da base da peça (QCI11):

- O valor de R^2 é baixo, o que indica pouca adequação do modelo;
- A distribuição normal dos resíduos e a sua aleatoriedade face aos valores previstos e observados, conduz à verificação de que não existem outros factores a influenciar a resposta;
- A única variável que influencia esta dimensão é o tempo (termo linear e quadrático).

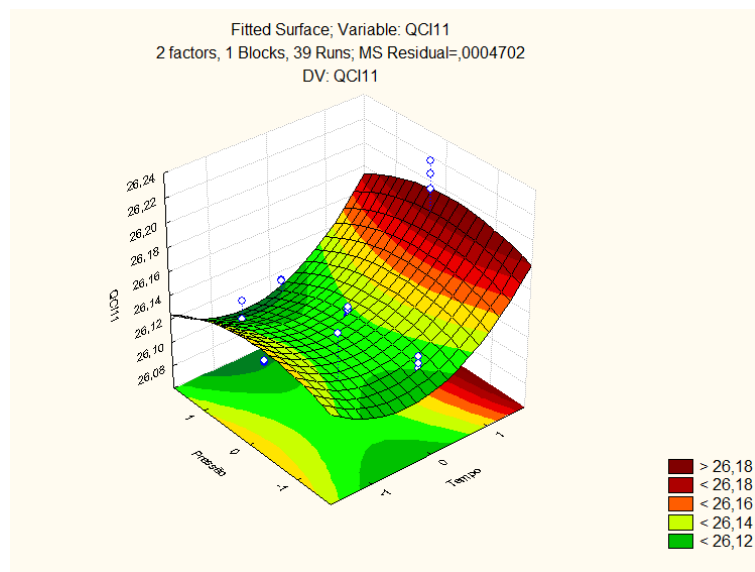


Figura 4.18: Superfície de resposta de $QCI11 = f(t, P)$

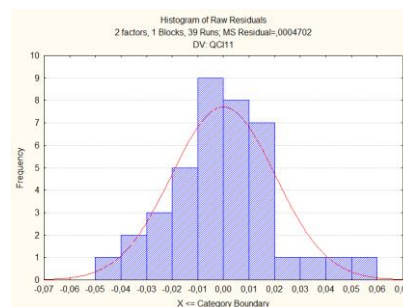


Figura 4.19: Histograma de resíduos ($QCI11$)

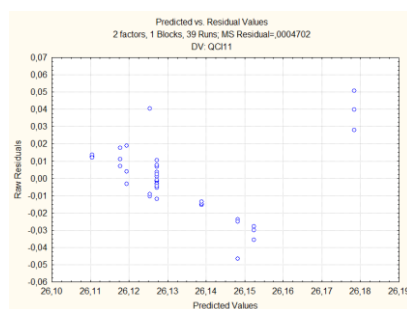


Figura 4.20: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo ($QCI11$)

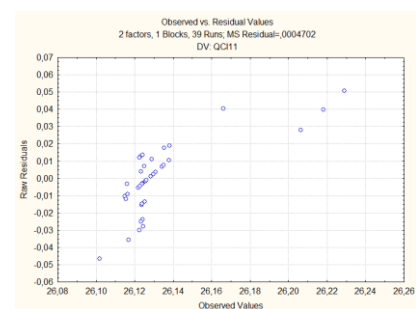


Figura 4.21: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios ($QCI11$)

4.2.6 Comprimento da torre (QCI12)

Factor	ANOVA Variável QCI12 $R^2 = 0.21667$				
	SS	g.l.	MS	F	p
t (L)	1.226623	1	1.226623	7.300865	0.010799
t (Q)	0.079416	1	0.079416	0.472684	0.496559
P (L)	0.060900	1	0.060900	0.362477	0.551249
P (Q)	0.000507	1	0.000507	0.003018	0.956520
$t \times P$	0.163053	1	0.163053	0.970495	0.331725
Erro	5.544352	33	0.168011		
Total SS	7.077919	38			

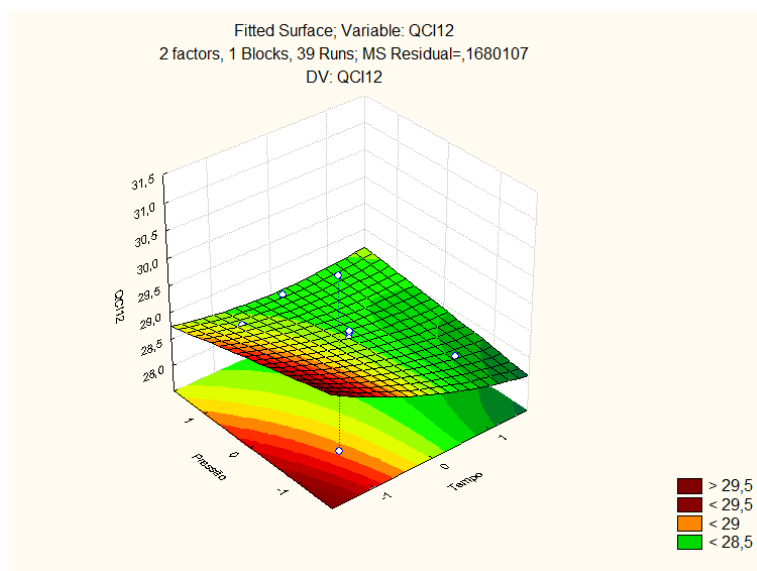


Figura 4.22: Superfície de resposta de $QCI12 = f(t, P)$

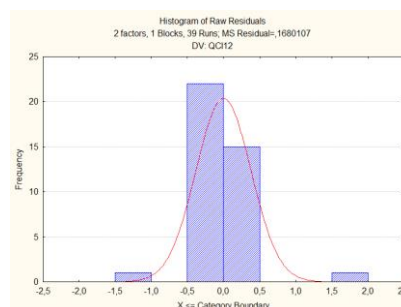


Figura 4.23: Histograma de resíduos (QCI12)

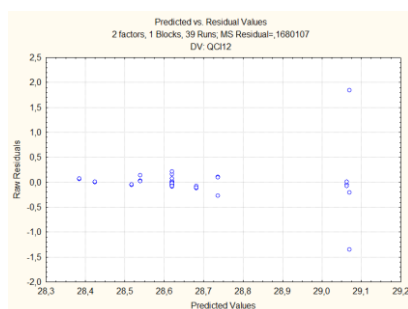


Figura 4.24: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo (QCI12)

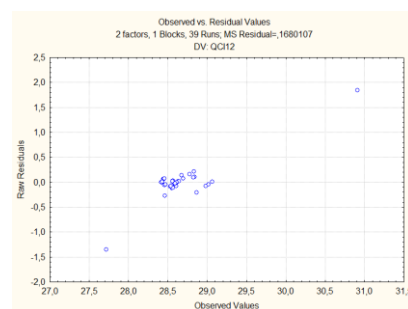


Figura 4.25: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios (QCI12)

O comprimento da torre (QCI12) é influenciado apenas pelo tempo da fase de pressurização. O valor de R^2 calculado é baixo, o que indica pouca adequação do modelo. No que diz respeito à análise dos resíduos, observou-se um padrão de comportamento que demonstra falta de ajuste do modelo.

4.2.7 Massa (QCI10)

Factor	ANOVA Variável QCI10 $R^2 = 0.33096$				
	SS	g.l.	MS	F	p
t (L)	0.005277	1	0.005277	5.198956	0.029193
t (Q)	0.026289	1	0.026289	2.589651	0.117090
P (L)	0.070485	1	0.070485	6.943404	0.012715
P (Q)	0.000282	1	0.000282	0.027765	0.868678
t x P	0.014700	1	0.014700	1.448079	0.237398
Erro	0.334995	33	0.010151		
Total SS	0.500710	38			

A massa (QCI10) é influenciada pelas duas variáveis da fase de pressurização (tempo e pressão). O valor de R^2 calculado é baixo, o que indica pouca adequação do modelo, que indica que o modelo obtido não estima com precisão a resposta. No caso de um ajuste adequado, os resíduos devem apresentar comportamento aleatório e seus valores devem ser muito próximos do valor zero. A observação do gráfico dos resíduos demonstra falta de ajuste do modelo.

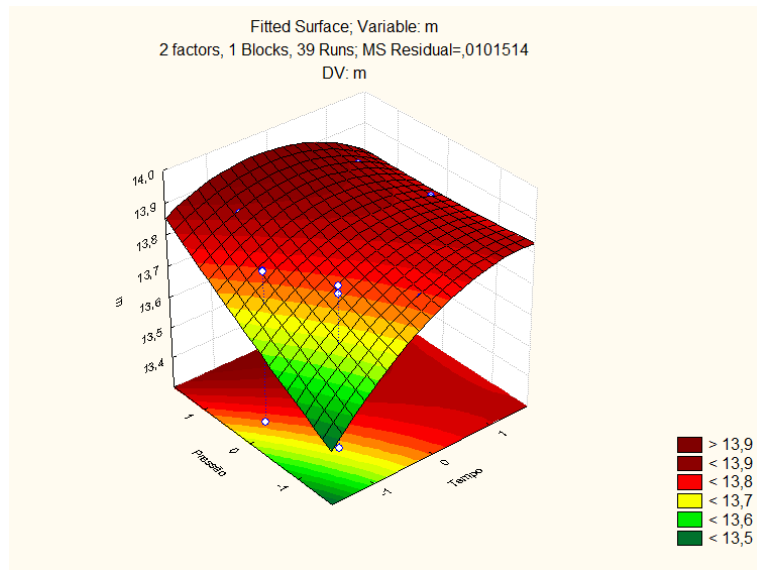


Figura 4.26: Superfície de resposta de m ($QCI10$) = $f(t, P)$

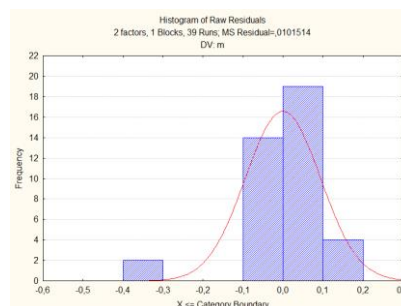


Figura 4.27: Histograma de resíduos ($QCI10$)

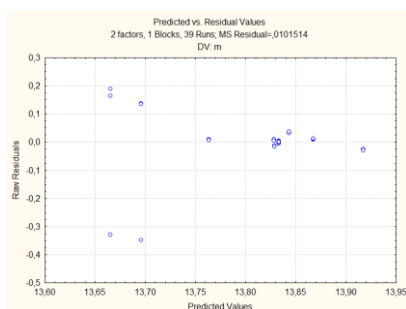


Figura 4.28: Análise dos resíduos face aos valores previstos pelo modelo ($QCI10$)

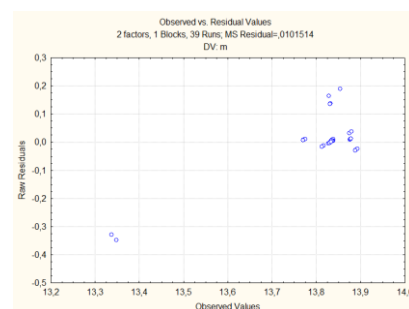


Figura 4.29: Análise dos resíduos face aos valores observados nos ensaios ($QCI10$)

Na Tabela 4.2 apresenta-se o resumo dos factores significativos para cada resposta. Não obstante alguns modelos terem demonstrado pouca adequação e falta de ajuste, os resultados obtidos mostram consistência com o processo físico. Assim, apesar de os resultados não serem

precisos em termos quantitativos, pode considerar-se que o comportamento das respostas face à variação dos factores pode constituir um contributo para o estudo das variáveis em questão.

Tabela 4.2: Factores significativos para cada resposta

	<i>Resposta</i>	<i>Factores significativos</i>	<i>Efeito</i>
KPC1	Diâmetro interior na zona dos terminais	Tempo (t) e Pressão (P)	↑ com ↑ (P) Valor mínimo para nível 0 de (t)
QCI3	Espessura do corte na secção C	Pressão (P)	↑ com ↑ (P)
QCI4	Comprimento da peça	Pressão (P)	↑ com ↑ (P)
QCI6	Diâmetro exterior do corte na secção C	Pressão (P)	↑ com ↑ (P)
QCI11	Diâmetro exterior da base da peça	Tempo (t)	↑ com ↑ (t)
QCI12	Comprimento da torre	Tempo (t)	↓ com ↑ (t)
QCI10	Massa	Tempo (t) e Pressão (P)	↑ com ↑ (P) ↑ com ↑ (t)

4.3 Resultados das simulações

Os parâmetros de processo obtidos na preparação do molde foram inseridos no programa de simulação *Moldex3D* para a realização da análise completa (injecção, pós-pressão, refrigeração e empeno) e serão comparados com os resultados anteriormente obtidos. Foram também realizadas as simulações tendo em conta o desenho de experiências, no qual foram mantidos todos os parâmetros constantes à excepção do tempo e pressão da fase de pressurização com valores segundo o planeamento do DOE. Para este documento não se tornar demasiado extenso, e pelo facto dos resultados alcançados apresentarem grande similaridade, optou-se por apresentar graficamente apenas um exemplo de cada *output* obtido pelo *software*.

4.3.1 Enchimento/Injecção

○ Tempo de enchimento

Nesta primeira análise é possível visualizar o padrão de enchimento da moldação das peças durante o tempo de injecção. A partir dos resultados da análise concluiu-se que o tempo necessário

para as peças estarem totalmente preenchidas é ligeiramente superior ao valor que foi inserido como *input* como tempo de enchimento (0.5 s). A Figura 4.30 mostra um exemplo do output do tempo de injeção obtido pelo *software* de simulação.

○ ***Linhas de soldadura***

A linha de soldadura é a linha onde duas ou mais frentes de fluxo se encontram quando não há possibilidade destas se juntarem durante o processo de moldação. Estas linhas causam áreas enfraquecidas nas peças moldadas e podem ocorrer roturas quando se aplicam tensões. Estas linhas podem ser originadas por:

- Temperaturas baixas no cilindro da máquina injectora ou do molde;
- Contra-pressão inadequada;
- Pressão de injeção ou velocidade de injeção baixas;
- Canais de alimentação e/ou pontos de injeção pequenos;
- Localização dos pontos de injeção incorrecta;

Na Figura 4.31 é possível visualizar que as linhas de soldadura se encontram no início da torre das peças (linhas a vermelho), zona essa onde as duas frentes de fluxo se encontram e a partir da qual o enchimento é feito como uma frente de fluxo apenas. Isto significa que o enchimento das peças é realizado perpendicularmente ao seu comprimento no início da torre sendo que em seguida o escoamento segue no sentido paralelo ao eixo de revolução em direcção à base das peças.

○ ***Bolsas de ar***

Nesta análise é possível visualizar a localização das bolsas de ar nas peças. As bolsas de ar surgem quando duas frentes de fluxo convergem em torno de uma ou mais bolhas de ar ou no fim dos trajectos de escoamento de material. Estas podem originar um enchimento e compactação incompletos, podendo estas bolhas provocar danos superfícies nas peças e/ou aquecerem em demasia e causar marcas de queimadura nas peças. As soluções possíveis para que se possa evitar este problema passam por obter uma melhor ventilação do molde para que estas bolhas de ar consigam escapar no momento de enchimento do material nas cavidades e um melhor balanceamento do sistema de alimentação. Pela Figura 4.32 é possível observar que as bolsas de ar se encontram na zona das linhas de soldadura (onde as duas frentes de fluxo convergem), na zona da torre que leva os terminais e na base das mesmas (fim do trajecto de escoamento de material).

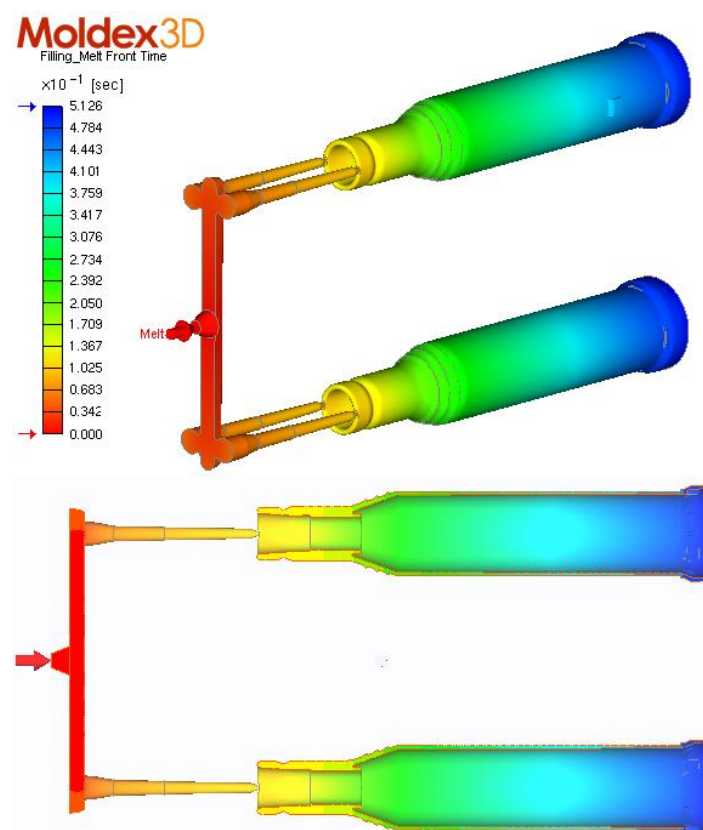


Figura 4.30: Tempo de injeção

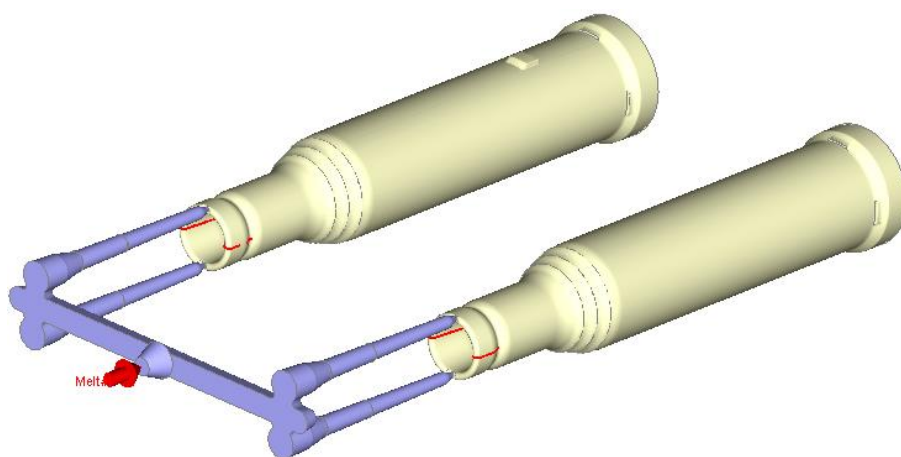


Figura 4.31: Localização das linhas de soldadura

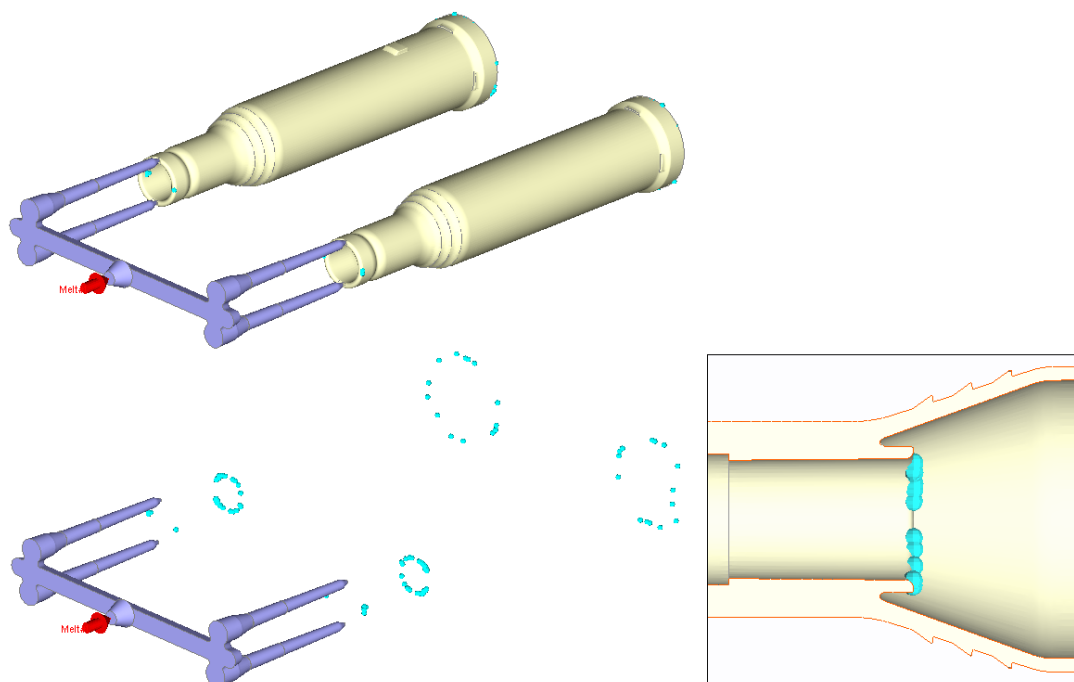


Figura 4.32: Localização das bolsas de ar

○ Contribuição dos pontos de injeção

Na Figura 4.33 é possível visualizar a contribuição de cada um dos quatro pontos de injeção no enchimento das duas peças. Observa-se ainda que as percentagens de enchimento de material de cada ponto de injeção têm valores próximos (28.45%, 24.62%, 21.55% e 25.38%) o que leva a concluir que os canais de alimentação estão bem balanceados.

Moldex3D

Filling_Gate Contribution

Plastic-1: PET(DuPont RYNITE RE5329 NC010)+Fiber
Plastic-2: PET(DuPont RYNITE RE5329 NC010)+Fiber
Gate#1 = 28.45 %
Gate#2 = 24.62 %
Gate#3 = 21.55 %
Gate#4 = 25.38 %

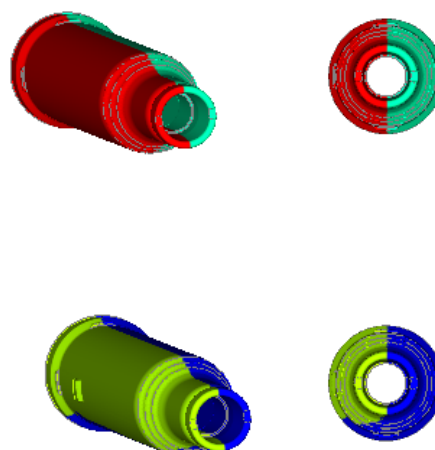


Figura 4.33: Contribuição dos pontos de injeção

○ *Pressão de injeção*

A distribuição de pressão nas cavidades é apresentada na Figura 4.34 em cores diferentes de forma decrescente do vermelho (zona com maior pressão) para o azul (zona com menor pressão) a dado instante, onde é visível a queda de pressão que ocorre ao longo do comprimento das peças até à última zona de contacto do material com as cavidades. Esta análise diz-nos que a pressão hidráulica necessária para encher as peças é de 119.171 MPa \cong 1191.71 bar o que não ultrapassa o máximo de pressão que a máquina injectora consegue actuar (1300 bar), o que leva a concluir que este processo não é limitado por pressão. Comparando com o estudo da queda de pressão utilizado na preparação do molde comprova-se que a pressão de injeção é a mesma (1192 bar obtidos na validação contra 1191.71 bar da simulação).

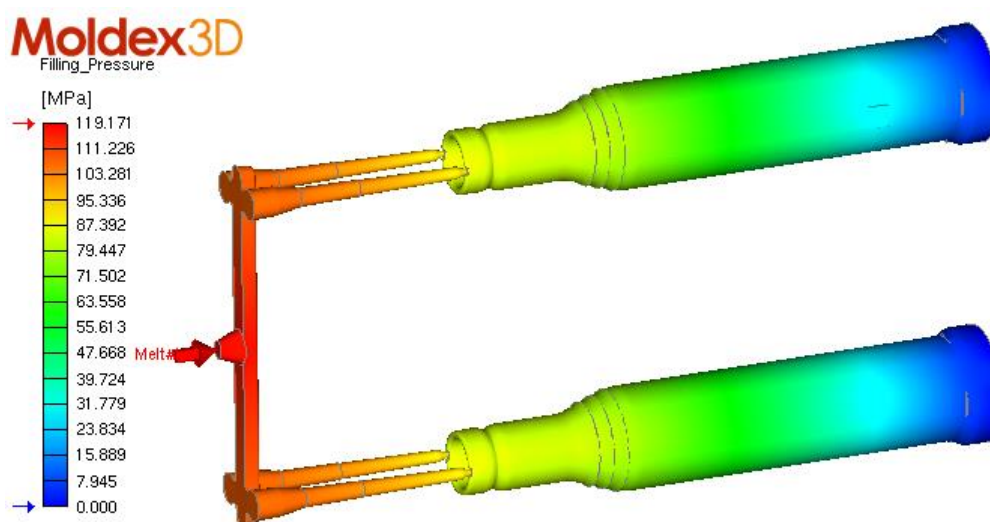


Figura 4.34: Pressão hidráulica

○ *Temperatura*

Nesta análise verifica-se a distribuição da temperatura das peças, onde se observa o fenómeno da camada congelada ou de material frio sendo visível a temperatura baixa à superfície das peças (devido ao contacto com as superfícies do molde) relativamente ao seu interior na imagem que se encontra seccionada (Figura 4.35). As zonas das peças de menor e maior diâmetro são as que se encontram a uma temperatura mais elevada sendo portanto as zonas mais afectadas termicamente e as que levam mais tempo a arrefecer.

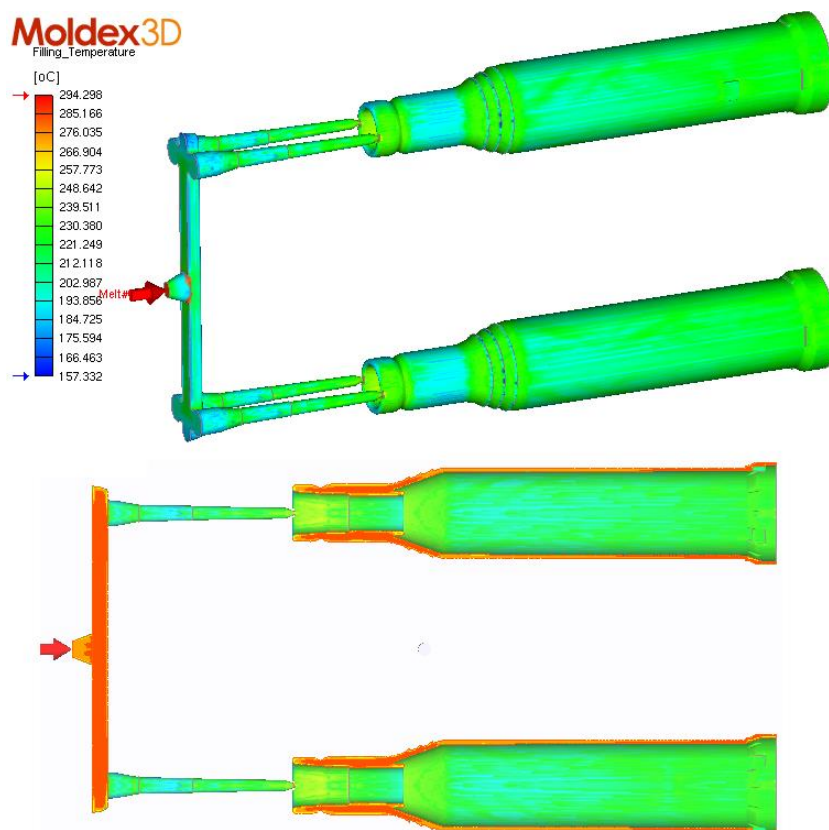


Figura 4.35: Distribuição da temperatura na fase de injeção

4.3.2 Compactação/Pressurização

○ Pós-pressão

Para compensar a quantidade de material perdida pelo fenómeno da contracção volumétrica do polímero, na fase de pós-pressão o material é compactado e necessita de uma pressão hidráulica constante de 53.883 MPa \cong 538.83 bar. Na preparação tinha sido obtido um valor de pós-pressão com perfil em rampa com início nos 800 bar (80 bar pressão específica) e fim nos 400 bar sendo portanto muito plausível a pressão obtida pela simulação para um perfil constante (Figura 4.36).

○ Contracção Volumétrica

A contracção volumétrica mostra a percentagem de alteração de volume devido a mudanças PVT (pressão-volume-temperatura) quando ocorre o arrefecimento da peça. Valores positivos representam a contracção volumétrica enquanto valores negativos representam expansão de volume devido a sobrepressão (*over-pack*). No resultado desta análise é possível observar que ocorre contracção volumétrica das peças com uma taxa máxima de 9.910% com especial referência

na torre e base (Figura 4.37). Tendo em conta que a contracção volumétrica não é uniforme em toda a peça, leva a concluir que ocorre empeno e surgem tensões residuais nas peças moldadas, que será analisado mais à frente. Esta alteração não uniforme do volume é devido à não uniformidade da distribuição de pressão e temperatura que já foram referidas nas duas análises anteriores.

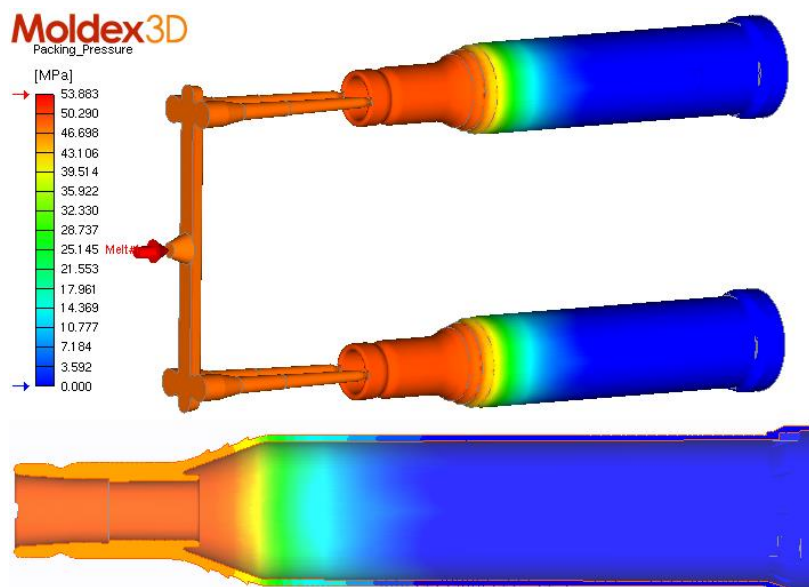


Figura 4.36: Pós-pressão necessária

○ **Temperatura**

A Figura 4.38 representa a distribuição da temperatura na fase de pós-pressão. A torre e base das peças são as zonas mais termicamente afectadas, notando-se nitidamente que são as zonas onde o polímero se encontra a temperatura superior do resto da peça, o que poderá proporcionar uma contracção volumétrica não uniforme e consequentemente empeno das peças.

○ **Indicador de Rechupes**

Aqui é analisado o valor e localização dos rechupes. O indicador de rechupes é utilizado também para avaliar o efeito da compactação do material. Se o indicador for positivo, significa que a compactação é insuficiente, o que poderá levar à formação de rechupes. Se o indicador for negativo, significa sobrepressão (*over packing*). Uma compactação correcta mantém o indicador perto de zero. Pela Figura 4.39 observa-se mais uma vez que a zona crítica (torre) é mais propensa à aparição de rechupes e também na zona da peça onde se encontra o número da cavidade, não sendo no entanto preocupante pois o valor do indicador é muito pequeno (0.0462), o que leva a concluir que a pós-pressão utilizada é suficiente para o total enchimento das peças.

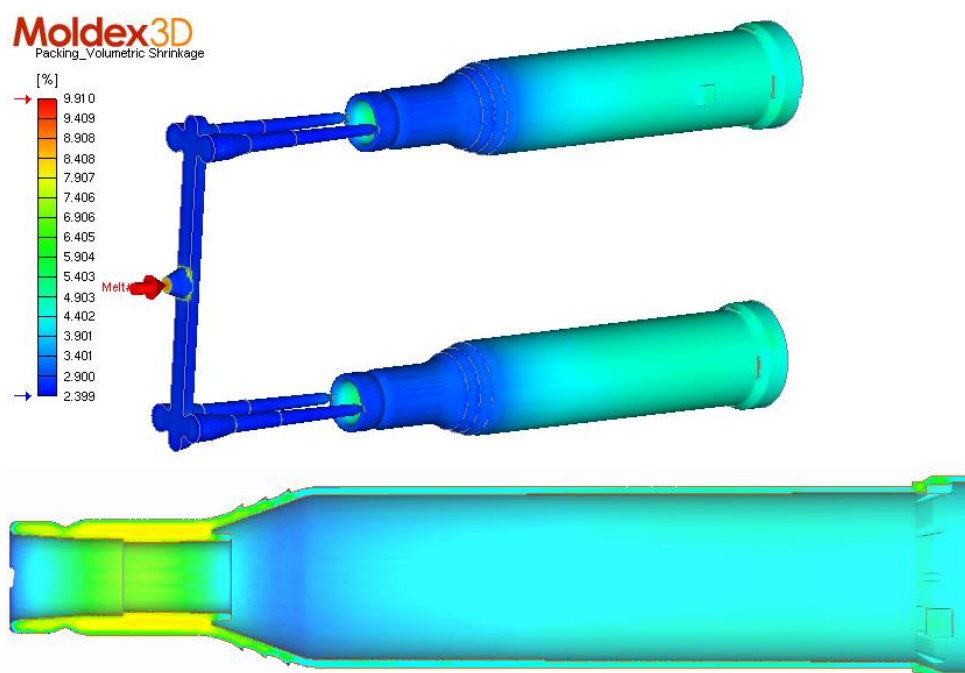


Figura 4.37: Contração volumétrica

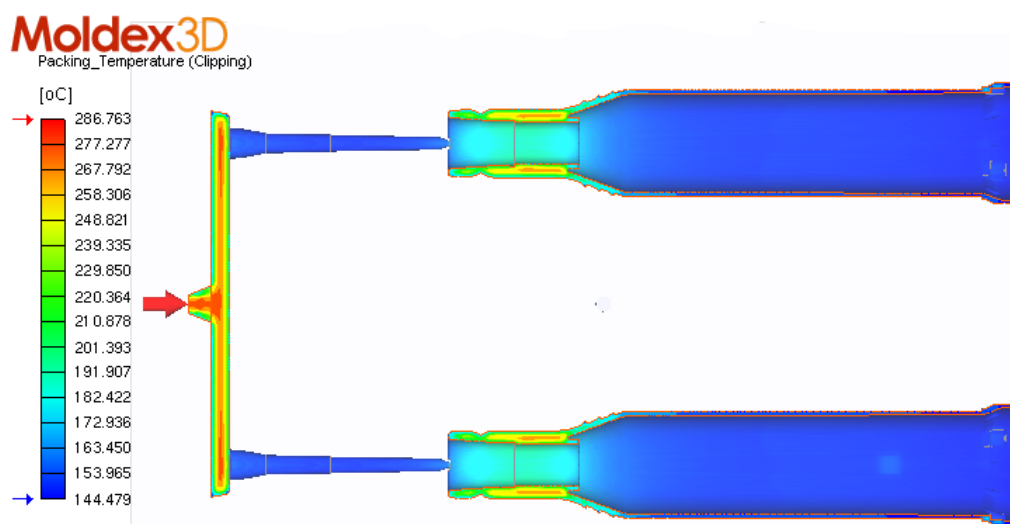


Figura 4.38: Distribuição de temperatura na fase de pós-pressão

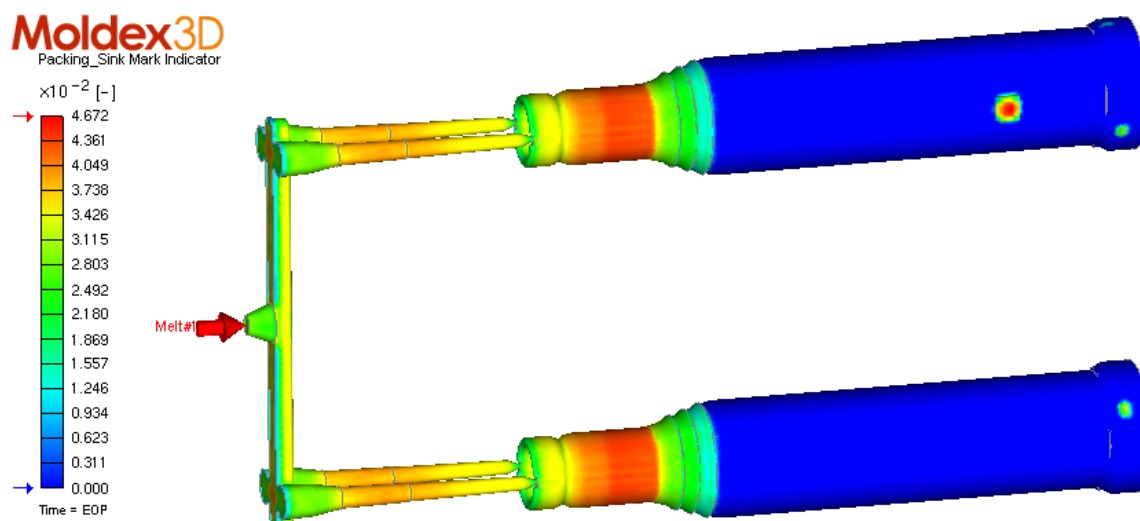


Figura 4.39: Indicador de rechupes

○ *Tensões de corte*

Segundo Shoemaker [12], o polímero ao fluir no interior da cavidade é sujeito a tensões de corte, ou tensões de corte de fluxo que orientam o material, isto é, fazem com que as moléculas se alinhem segundo a direcção do fluxo. As tensões de corte são máximas à superfície por ser a zona que arrefece mais rápido e tendem para zero em direcção ao centro por ser a zona que tem um maior tempo de refrigeração, dando mais tempo para as moléculas se orientarem. As zonas onde se verificam maiores valores de tensão são, pela Figura 4.40, no corpo das peças e na base devido a ser a zona onde o material arrefece mais rapidamente (verificado na análise da temperatura) com um valor máximo de tensão de corte de 3.980 MPa.

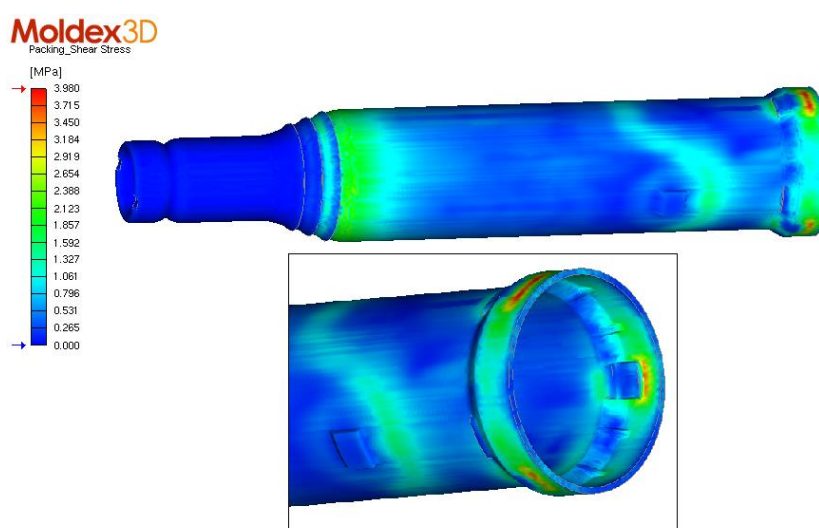


Figura 4.40: Tensões de corte de fluxo

○ Gráficos

O gráfico representado na Figura 4.41 mostra o comportamento da pressão em função do tempo desde o início do ciclo até o fim da fase de pós-pressão. Neste é possível observar o valor da pressão de injeção que corresponde ao pico de pressão do gráfico e verifica-se que corresponde aos 119.7 MPa já referidos anteriormente. Após o pico de pressão é de notar que a pressão segue um perfil em rampa invés do habitual valor constante de pressão no processo de injeção. Segundo Chen e Gao [24], este perfil de pressão tem a vantagem de ter uma melhor distribuição da espessura das peças do que um perfil constante, o que proporciona a uma contracção volumétrica mais regular e consequentemente menor empeno nas peças. No perfil teórico antes de atingir o pico de pressão o gráfico é uma linha recta, o que não acontece no caso real tal como é possível observar pelas duas irregularidades na recta ascendente. A primeira ocorre na passagem do canal primário do sistema de alimentação para os canais secundários e a segunda nos pontos de injeção. Isto ocorre devido ao atrito causado pela mudança de direcção do fluxo de material e alteração brusca da área da secção transversal. Neste gráfico é possível extrair o tempo de pós-pressão subtraindo ao tempo do final desta fase dado pelo gráfico (4.705 s) o tempo de injeção (0.5126 s) o que dá 4.1924 s contra os 4 s obtidos na preparação do molde.

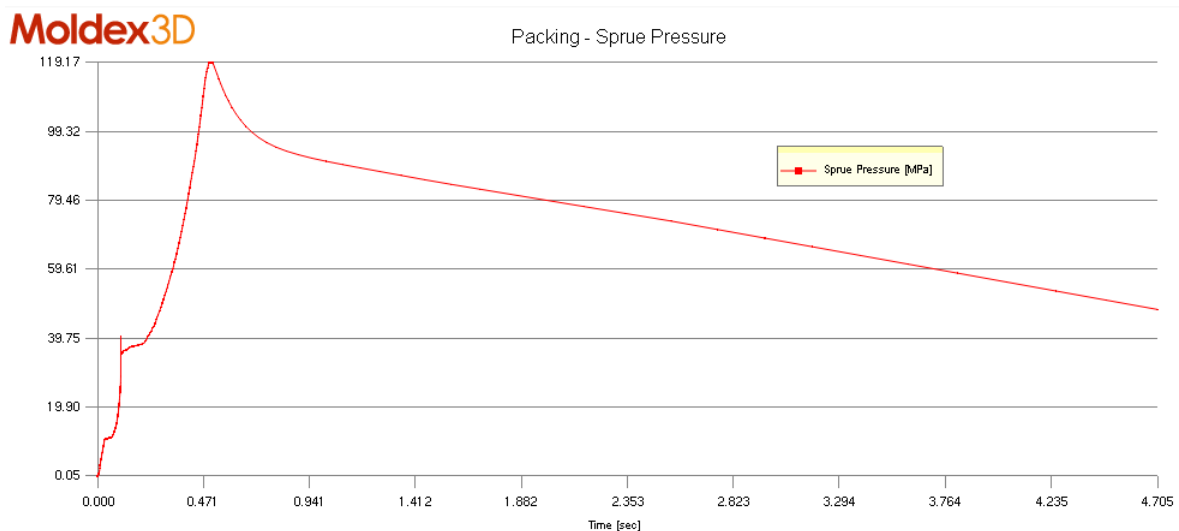


Figura 4.41: Gráfico pressão em função do tempo

A força de fecho do molde, responsável por manter o molde fechado contrariando a pressão de injeção e pós-pressão, pode ser vista no gráfico da Figura 4.42 em função do tempo. O seu valor máximo (correspondente ao ponto do pico de pressão) é de 15.49 toneladas de força (154.9 kN). Segundo vários fabricantes de máquinas injetoras a força de fecho não deve passar dos 70% da capacidade da máquina utilizada devido ao risco elevado da ocorrência de rebarbas nas peças. Como foi descrito anteriormente a máquina injetora utilizada tem uma capacidade de 1200 kN logo não existe qualquer tipo de problema relacionado com a força de fecho na qualidade

das peças. Na preparação havia sido introduzido 800 kN como medida de segurança tendo sido agora demonstrado na simulação que um terço de esse valor teria sido mais que suficiente para desempenhar correctamente a função.

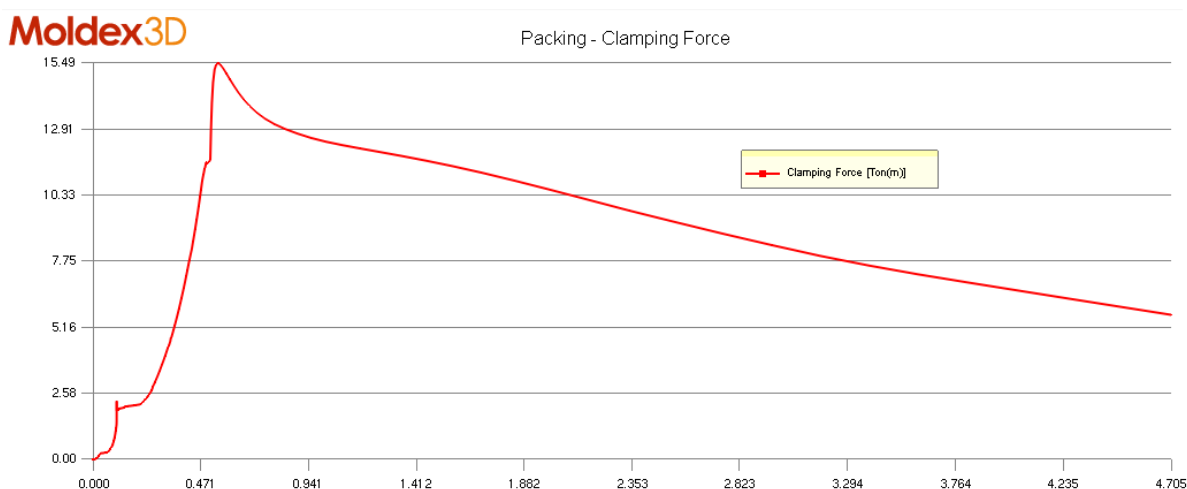


Figura 4.42: Gráfico força de fecho em função do tempo

Os gráficos da Figura 4.43, representam o enchimento das cavidades, com o aumento da massa das mesmas em função do tempo. A Figura 4.43a) corresponde à cavidade 12 e a Figura 4.43b) à cavidade 13. A Figura 4.43c) representa a sobreposição dos dois gráficos anteriores. Neste último é possível verificar que as curvas de ambas cavidades estão alinhadas o que significa estas estão bem equilibradas e efectuem o enchimento das peças ao mesmo tempo e com a mesma quantidade de material. Este facto já havia sido mencionado na preparação do molde aquando do estudo do balanceamento das cavidades e comprova-se o mesmo agora na simulação.

4.3.3 Refrigeração

○ Temperatura das peças

Esta análise dá-nos a distribuição de temperatura na fase de refrigeração das peças. Na Figura 4.44 representam-se duas imagens das peças seccionadas com e sem os canais de alimentação onde se observa que as temperaturas mais elevadas se encontram no interior das peças visto que o arrefecimento se dá desde a superfície destas para o interior. É de referir que a zona crítica das peças, na torre, encontra-se a uma temperatura muito superior que as restantes zonas das peças, que se encontram muito próximas da temperatura da água que circula no molde para refrigerar o mesmo (144.689 °C contra os 140°C).

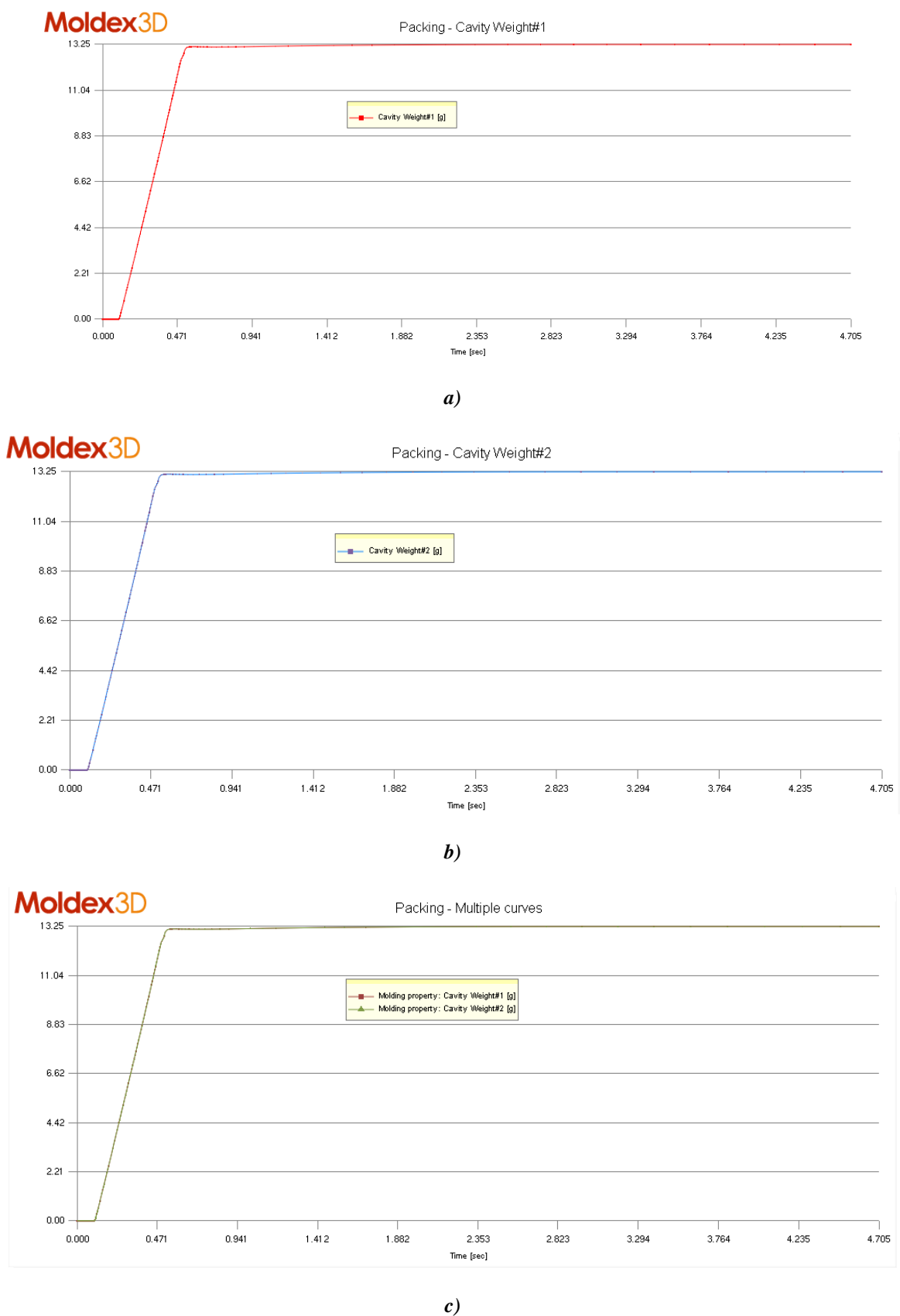


Figura 4.43: Gráficos massa das cavidades em função do tempo

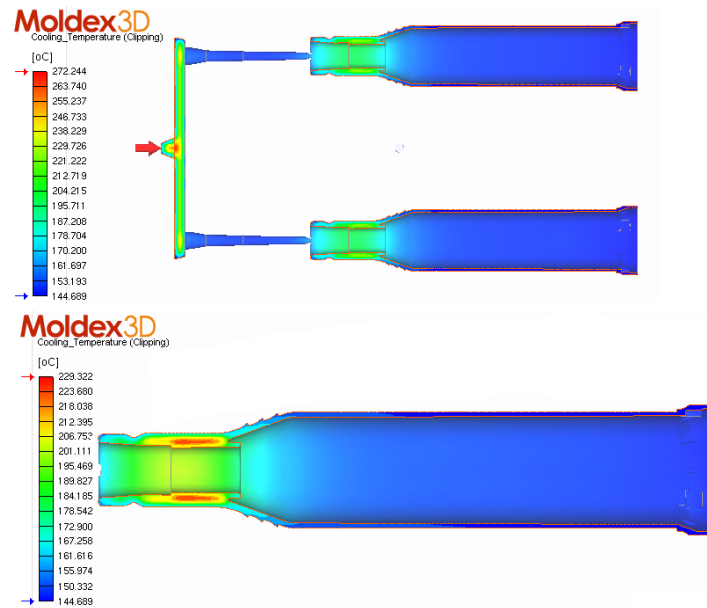


Figura 4.44: Temperatura de refrigeração com e sem sistema de alimentação

○ Temperatura dos canais de refrigeração

Na Figura 4.45 estão dispostos os canais de refrigeração com o respectivo valor de temperatura da água na fase de arrefecimento das peças. A temperatura tem uma pequena variação sendo o valor mais elevado nos canais mais próximos das peças, nomeadamente os canais no interior das buchas, mas mantendo-se sempre muito próximo dos 140°C introduzidos como valor referência.

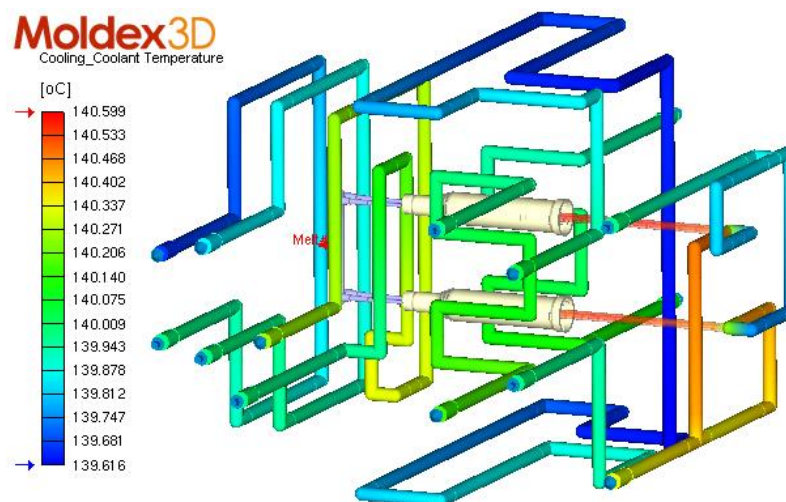


Figura 4.45: Temperatura nos canais de refrigeração

○ *Tempo de arrefecimento*

Aqui é mostrado o tempo estimado desde o fim da compactação do material tendo em conta a temperatura à qual o material se encontra no fim dessa fase até ao instante ao qual a temperatura do interior do polímero está baixa o suficiente para a peça ser ejetada do molde. A Figura 4.46 mostra que as superfícies exteriores tanto das peças como dos canais de alimentação atingem a temperatura adequada em poucos segundos mas, quando seccionadas, é possível observar que no interior os canais de alimentação, que se encontram a uma temperatura mais elevada, levam 45.834 s para serem totalmente arrefecidos e a secção crítica das peças (torre) leva 25.834 s. Os 8 s obtidos na validação como tempo de arrefecimento são realmente suficientes para arrefecerem toda a superfície da peça. No entanto, como no interior da secção crítica o tempo necessário para arrefecer totalmente o polímero é cerca de 3 vezes superior (25.834 s), esta secção poderá trazer problemas de resistência mecânica e empeno o que será analisado mais à frente.

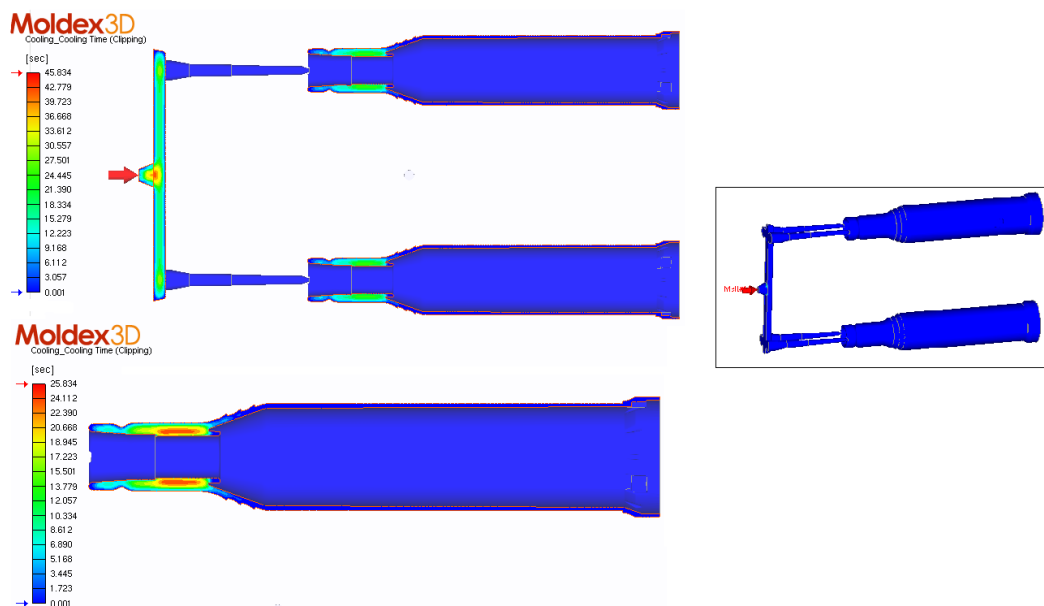


Figura 4.46: Tempo de arrefecimento com e sem sistema de alimentação

○ *Eficiência da refrigeração*

Esta análise dá-nos a eficiência de cada um dos canais de refrigeração, mostrando a percentagem de calor retirado por cada um deles. Aqui é possível perceber a razão da zona da torre ser a zona mais termicamente afectada visto que o canal de refrigeração no interior da bucha não atinge esta zona e não existe nenhum canal que passe perto da sua superfície (Figura 4.47). Como seria de esperar, os canais mais perto das peças são os mais relevantes tendo a maior percentagem de eficiência e o facto de existirem canais que assumem valores negativos significa que em vez de absorverem calor estão a libertá-lo sendo portanto prejudiciais no arrefecimento das peças. No

entanto, são importantes para evitar que a contracção volumétrica seja mais elevada tendo em conta a diferença de temperaturas no contacto entre as superfícies moldantes e o material fundido.

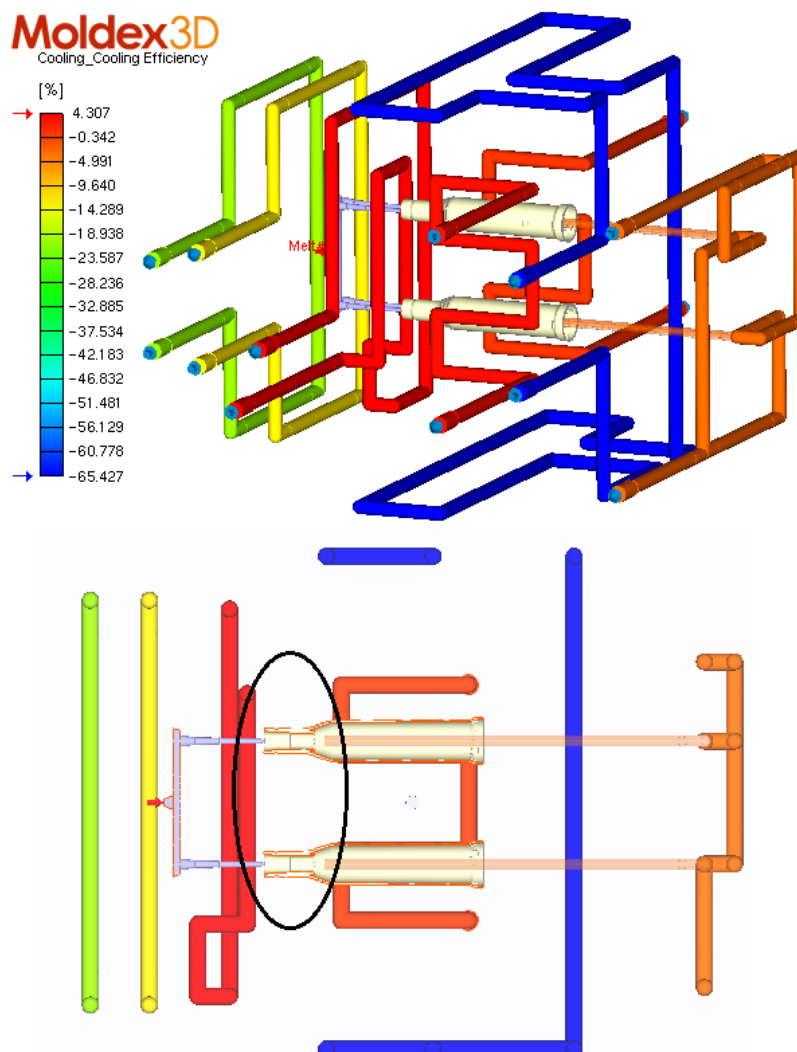


Figura 4.47: Eficiência da refrigeração

○ *Taxa de Camada congelada*

Nesta análise é possível observar a solidificação causada pelo arrefecimento na formação da camada perto da superfície da cavidade. Com o aumento do tempo, a espessura desta camada aumenta, reduzindo a secção transversal do caminho do material fundido mas também aumenta a resistência do fluxo e a pressão nos canais de alimentação. Além disso, as tensões residuais e a orientação induzida por fluxo vão ser afectadas. O valor de taxa de 100% significa que a peça arrefeceu totalmente em toda a sua espessura e mais uma vez se comprova que quase toda a peça consegue atingi-lo em 8 s ficando apenas parte da zona da torre com cerca de 20% de taxa de camada congelada o que significa que os restantes 80% localizados no interior entre a camada não se encontram à temperatura de extracção (Figura 4.48).

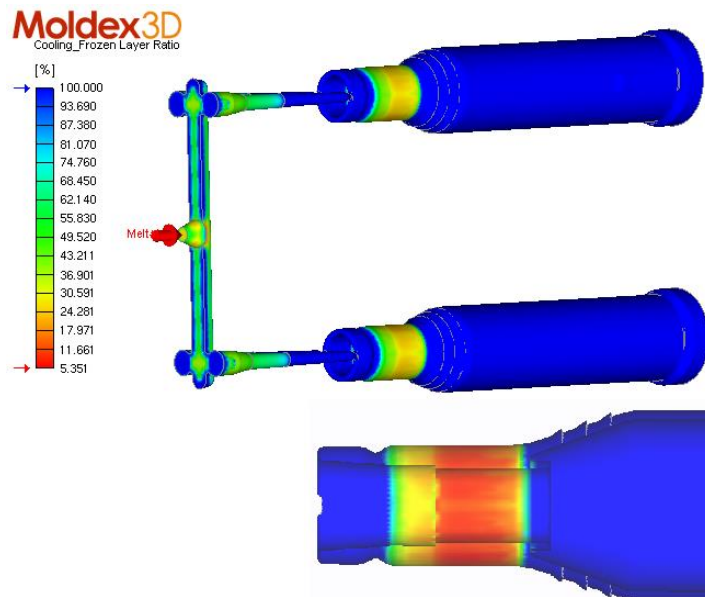


Figura 4.48: Taxa de camada congelada

○ **Empeno**

Como foi mencionado anteriormente, a contracção volumétrica não é uniforme em toda a peça, logo irá ocorrer empeno das peças moldadas. Será feita uma análise do empeno em cada direcção e em seguida uma análise total. As peças com o respectivo referencial utilizado podem ser observadas na Figura 4.49.

▪ **Empeno das peças na direcção X, Y e Z**

Esta análise mostra o empeno nas peças segundo a direcção X, Y e Z (Figura 4.50, Figura 4.51 e Figura 4.52, respectivamente) depois destas serem extraídas do molde e arrefecidas até à temperatura ambiente. É possível comprovar que ocorre um menor empeno nas direcções transversais das peças ($X=0.2391$ mm e $Z=0.2378$ mm) do que na direcção longitudinal das mesmas ($Y=1.317$ mm), o que demonstra coerência com os aspectos físicos do processo uma vez que esta última é a direcção de enchimento das peças. O valor de empeno mais elevado ocorre na zona da torre o que era previsível, como referido anteriormente, por ser a zona mais termicamente afectada.

▪ **Empeno total das peças**

Esta análise mostra o empeno total na peça (tendo em conta as três direcções). As secções de maior e menor diâmetro são as mais afectadas, sendo esta última a que atinge um maior valor deste fenómeno (Figura 4.53). Sendo esta secção a mais crítica e afectada

termicamente, era de esperar que tivesse uma contracção volumétrica diferente da restante peça e portanto um valor de empeno superior (1.324 mm).

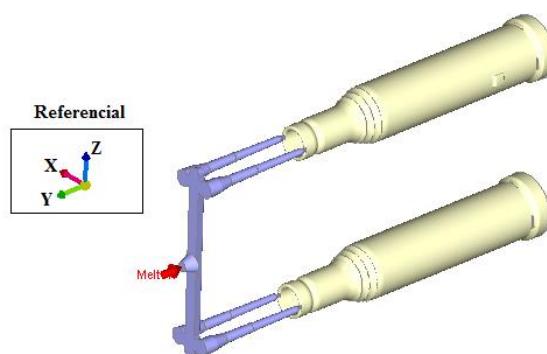


Figura 4.49: Peças com respectivo referencial

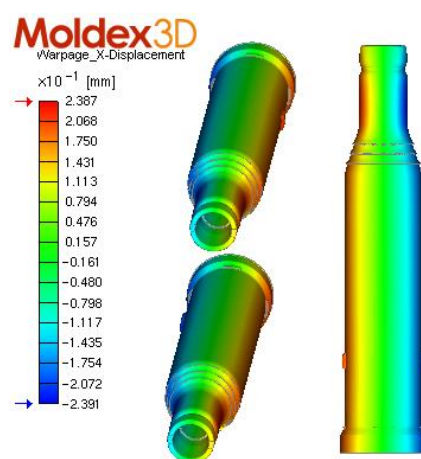


Figura 4.50: Empeno segundo a direcção X

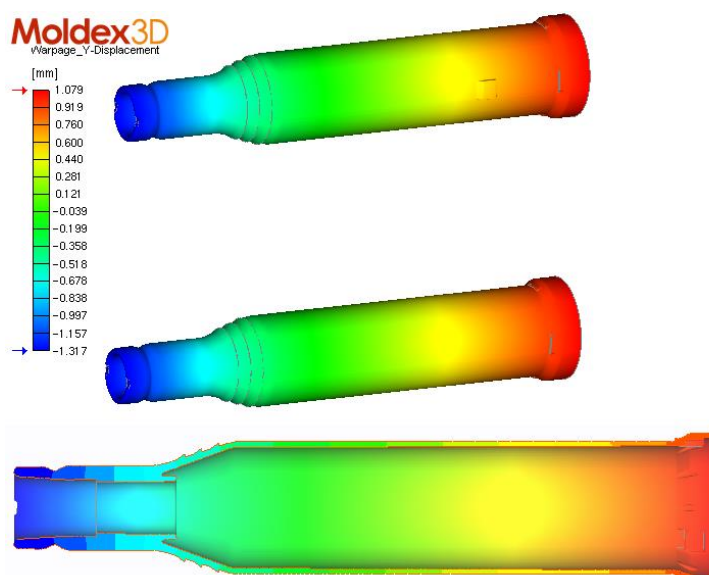


Figura 4.51: Empeno segundo a direcção Y

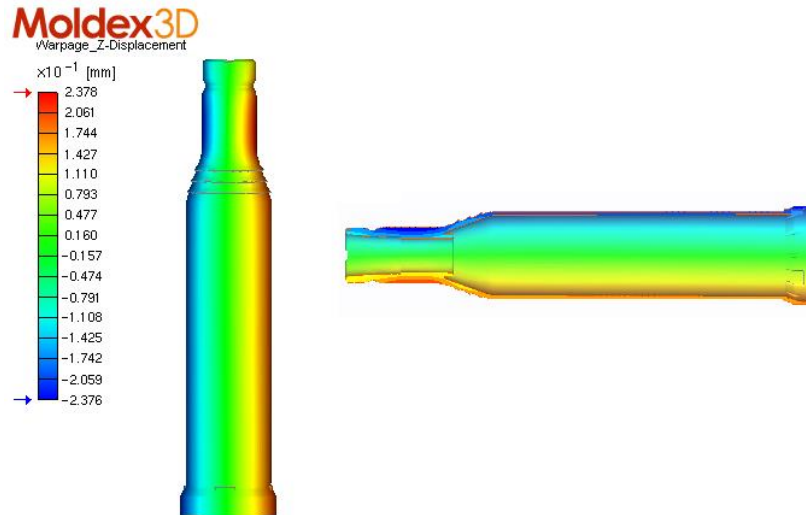


Figura 4.52: Empeno segundo a direcção Z

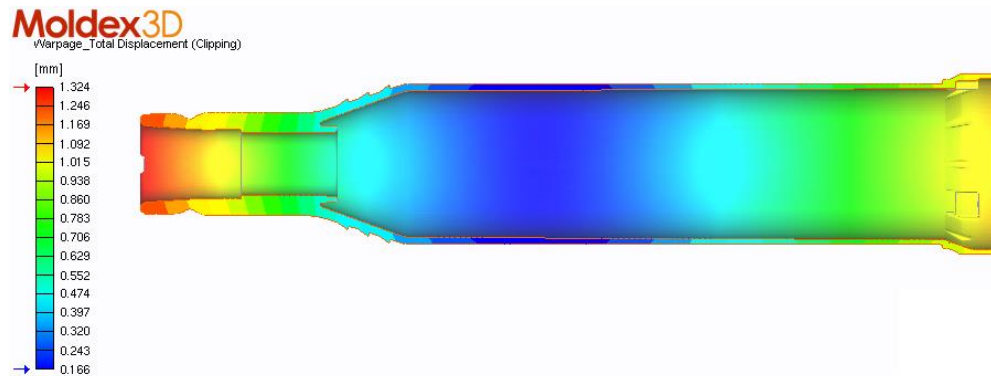


Figura 4.53: Empeno total da peça

Concluiu-se ainda que os resultados obtidos na simulação tendo em conta o desenho de experiências, demonstraram coerência com as tendências obtidas pela metodologia de superfície de resposta, o que mostra que a sua utilização pode constituir um auxílio importante para a preparação dos moldes de novas peças a produzir. No entanto, os valores obtidos nem sempre foram consistentes, mas este facto era já expectável devido à pouca adequação de alguns dos modelos obtidos empiricamente.

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões e contribuições

O estudo conduzido nesta dissertação teve como principal objectivo a análise experimental da influência dos parâmetros de pressurização na qualidade de peças termoplásticas produzidas por injeção. Com o intuito de cumprir o objectivo traçado, foram realizadas simulações do processo de injeção através do *software Moldex3D* e comparadas com as curvas de superfície de resposta obtidas pelo desenho de experiências com dois factores a três níveis.

No que diz respeito aos resultados experimentais a sua análise foi realizada no capítulo anterior. Assim, neste ponto serão referidas apenas as principais conclusões, sendo essas:

- A construção da *Bill of Process (BoP)*, como auxílio da preparação dos novos moldes, permitiu demonstrar, de forma esquemática, como o processo está implementado na empresa com a indicação dos parâmetros de processo do equipamento responsável pela transformação do plástico granulado até as peças pretendidas, e servirá de *roadmap* para futuras implementações de novos moldes.
- As novas folhas de *setup* para a preparação dos moldes contêm mais informação acerca do processo com a introdução dos resultados dos 6 estudos com a componente gráfica a ser uma mais-valia para maior compreensão do comportamento dos principais parâmetros ao longo de todo o ciclo.
- A aplicação da metodologia de superfície de resposta demonstrou-se eficaz para realização da análise da influência dos parâmetros de pressurização. Alguns dos modelos obtidos apresentam factores de adequação baixos, pelo que se conclui serem pouco conclusivos do ponto de vista quantitativo. No entanto, os factores considerados significativos são fisicamente coerentes, o que indicia que se podem considerar as tendências das variáveis das superfícies de resposta.
- Os resultados dados pelas simulações mostraram uma deficiência no circuito de refrigeração do molde utilizado, nomeadamente nas torres das peças, sendo a parte mais

termicamente afectada durante o processo. No entanto, a rotura das peças deu-se em zonas distintas, o que pode sugerir a existência de algum defeito no molde.

- Os valores obtidos experimentalmente são idênticos aos resultados da simulação o que leva a concluir que o *Moldex3D* é preciso e demonstra ser um bom complemento na preparação de moldes.

Finalmente, pode afirmar-se que foram atingidos os objectivos inicialmente propostos, no que diz respeito à análise da influência dos parâmetros de pressurização na qualidade de peças termoplásticas produzidas por injeção.

No que diz respeito ao contributo tecnológico para a empresa, este trabalho foi de grande importância por ter criado as linhas de orientação a serem seguidas em projectos de novos moldes. Os documentos concebidos servirão no futuro como guia para novos engenheiros que integrem os quadros da empresa. Por outro lado, desmistificou a importância dada à influência dos parâmetros de pressurização sobre as características mecânicas das peças produzidas, que se demonstrou não existir.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

Durante a investigação apresentada neste trabalho alguns aspectos que poderiam melhorar a qualidade dos resultados foram identificados. A partir dessas observações, sugere-se como trabalho futuro a abordagem dos seguintes aspectos:

- Realização de um estudo semelhante variando agora a temperatura da água nos termorreguladores a fim de se perceber a influência da temperatura do molde na qualidade das peças assim como as diferentes as oscilações de temperatura que ocorrem durante todo o processo.
- Desenvolvimento de um novo estudo para preparação do molde relativo à capacidade da bomba hidráulica presente na máquina injectora. Para este efeito, a nova folha de *setup* criada contém já os espaços correspondentes. Esta introdução foi efectuada de forma a existir mais informação sobre o molde e o processo (já discutidos com a empresa). O objectivo deste estudo é a identificação, para cada máquina, da pressão a partir da qual a velocidade de injeção determinada pelo primeiro estudo (da viscosidade) não consegue ser alcançada, ou consegue com alguma hesitação. Tendo em conta a pressão hidráulica obtida neste estudo, será ainda necessário construir o gráfico da pressão da bomba em função do diâmetro do fuso existente na máquina (gráfico pressão de injeção específica). Com o

auxílio deste gráfico será possível estimar a pressão específica de injeção para esses mesmos valores para evitar variações de máquina para máquina.

- Análise das capacidades referentes aos valores dos parâmetros obtidos na preparação, nomeadamente o volume de dosagem, o tempo de injeção, a pressão de injeção, a almofada e o curso total de dosagem. O espaço referente ao controlo estatístico do processo foi também acrescentado na nova folha de *setup*.

•

Referências Bibliográficas

- [1] T. Osswald, L.-S. Turng, and P. Gramann, *Injection Molding Handbook*, 2^o Edição. Hanser Publications, 2008.
- [2] S. Kulkarni, *Robust Process Development and Scientific Molding*. Hanser Publications, 2010.
- [3] L. Rodrigues, “Aplicação dos Métodos de Taguchi e Estudo da Capacidade do Processo: Caso de Estudo na Indústria Automóvel,” Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [4] BERU, “Tudo sobre bobinas de ignição - Informações técnicas n.o 07.” Federal Mogul, 2013.
- [5] D. O. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*. Hanser Publications, 2007.
- [6] J. Greener and R. Wimberger-Friedl, *Precision Injection Molding - Process, Materials, and Applications*. Hanser Publications, 2006.
- [7] M. Garcia, *CEFET-RS – Fundamentos de projetos de ferramentas*. [Online]. Available: www.ebah.com.br/content/ABAAAE1RMAK/apostila-moldes-cefet-rs [Accessed: 13-Oct-2015].
- [8] P. Kennedy and R. Zheng, *Flow Analysis of Injection Molds*, 2^o Edição. Hanser Publications, 2013.
- [9] H. Santana, “Moldes de Injecção.” Centro de Educação Tecnológica do Paraná, Jul-2002.
- [10] H. Rees, *Understanding Injection Mold Design*. Hanser Publications, 2001.
- [11] F. Rodrigues, “Estudo Teórico-Experimental do Fabrico de Peças Poliméricas por Injecção,” Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2010.
- [12] J. Shoemaker, *Moldflow Design Guide - A Resource for Plastics Engineers*, 1^o Edição. Moldflow Corporation, 2006.
- [13] J. Technik, “Injection Mold Cooling Configuration,” *ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering*, 2010. .
- [14] T. Bom, “Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injecção de plásticos,” Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2014.
- [15] D. V. Rosato, D. V. Rosato, and M. Rosato, *Injection Molding Handbook*, 3^o Edição. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [16] M. R. Kamal, A. Isayev, and S.-J. Liu, *Injection Molding - Technology and Fundamentals*. Hanser Publications, 2009.
- [17] ENGEL, “Application Technology.” 2012.

- [18] “Neofyton --insert machine for inserting metal elements,” 2008. [Online]. Available: <http://www.neofyton.com/sr/349>. [Accessed: 13-Oct-2015].
- [19] “ENGEL at the DKT/IRC 2015 - ENGEL Austria.” [Online]. Available: <http://www.engelglobal.com/en/at/news-press/news-press-releases/detail/news/detail/News/engel-at-the-dktirc-2015.html>. [Accessed: 13-Oct-2015].
- [20] Sabic Innovative Plastics, “Guia de Processamento.” Documento técnico, 2008.
- [21] DuPont, “Guia de Moldagem.” Feb-2002.
- [22] HB-Therm, “Temperature Control Units - Product Catalogue.” Mar-2015.
- [23] H. Y. Wong, K. T. Fung, and F. Gao, “Development of a transducer for in-line and through cycle monitoring of key process and quality variables in injection molding.” 2007.
- [24] X. Chen and F. Gao, “A study of packing profile on injection molded part quality.” Elsevier, Apr-2003.
- [25] M.-C. Huang and C.-C. Tai, “The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature.” Elsevier, 1999.
- [26] Z. L. Pereira and J. G. Requeijo, *Qualidade - Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, 2^o Edição. Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [27] J. A. Cornell, *How to Apply Response Surface Methodology*. Volume 8. ASQC Quality Press, 1990.
- [28] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5^a Edição. Arizona State University, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [29] C. M. Machado, *Modelos estatísticos para a caracterização de texturas produzidas por electroerosão*, Tese de Mestrado, FCT-UNL, Lisboa, 2002.
- [30] Central Composite Designs (CCD), *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*, Apr-2012.

Anexo A: Propriedades do material

Property	Test Method	Units	Value
Mechanical			
Stress at Break 5mm/min	ISO 527-1/-2	MPa	122
Strain at Break	ISO 527-1/-2	%	2
Tensile Modulus	ISO 527-1/-2	MPa	11200
Notched Izod Impact	ISO 180/1A	kJ/m ²	3.8
Notched Charpy Impact	ISO 179/1eA	kJ/m ²	5.2
Unnotched Charpy Impact	ISO 179/1eU	kJ/m ²	22
Thermal			
Deflection Temperature 1.80MPa	ISO 75-1/-2	°C	203
Melting Temperature	ISO 3146C	°C	247
Electrical			
Electric Strength 1mm, 23°C	IEC 60243-1	kV/mm	37.3
1mm, 150°C			37.7
Other			
Density	ISO 1183	kg/m ³	1630
Processing			
Melt Temperature Range		°C	270-300
Melt Temperature Optimum		°C	280
Mould Temperature Optimum		°C	120
Drying Time, Dehumidified Dryer		h	4
Drying Temperature		°C	120
Processing Moisture Content		%	<0.02
Snake Flow		mm	
Mould shrinkage	ISO 294-4	%	
parallel			0.2
normal			0.4
90MPa, 5x0.30mm			8
90MPa, 5x0.50mm			29
90MPa, 5x0.75mm			62
90MPa, 5x1.00mm			99

Anexo B: Programas desenvolvidos em *Matlab*

```
function createfigure(X1, Y1)
%CREATEFIGURE(X1,Y1)
% X1: vector of x data
% Y1: vector of y data

% Create figure
figure1 = figure('Color',[1 1 1]);

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'FontSize',16);
hold(axes1, 'all');

% Create plot
plot(X1,Y1, 'LineWidth',2, 'Color',[0 0 1]);

% Create xlabel
xlabel('Nominal Strain [mm]', 'FontSize',16);

% Create ylabel
ylabel('Standard Force [N]', 'FontSize',16);
```

```
function Graphs(y)
clc;
%Opens txt file
gslib_file_name=input('Enter the gslib file name: ','s');

%Reads data from txt file
data=load(gslib_file_name);
SF=data(:,1);
NS=data(:,2);

%Max Standard Force
Fmax=max(SF);

%Strain at break
Sb=max(NS);

%Force at break
idx=find(NS==Sb);
Fb=SF(idx);
idx1=find(SF==Fmax);
Smax=NS(idx1);

%Create lines for Fmax and Fb
NSmax=linspace(0, Smax, 3000);
SFmax=linspace(-50, Fb, 3000);

%Create figure
%createfigure_b - blue line
createfigure_b(NS,SF);
hold on;
plot(NS,Fb);
plot(Sb,SFmax);
plot(NSmax,Fmax);
```


Anexo C: Considerações de processo e notas dos fabricantes

CONSIDERAÇÕES DE PROCESSO E NOTAS DOS FABRICANTES									
PARÂMETROS DE AFINAÇÃO (INPUTS)									
● Para as máquinas com controladores CC200 todos os perfis foram definidos com 5 pontos na Folha de Setup podendo este número ser alterado na máquina (se para tal for necessária a inclusão de mais pontos).									
FECHO DO MOLDE									
● No perfil de velocidades a máquina só permite introduzir 3 velocidades e respectivas posições. [CC100]									
● Curso de abertura, A (curso mínimo): comprimento da peça + 5mm. [CC100] *									
● Protecção de molde: Para uma protecção de molde eficaz, ajustar a velocidade tão lenta quanto for possível. [CC100/CC200] Escolher uma força tanto quanto possível pequena devido ao fim do processo do fecho. [CC100/CC200] Ajustar "iniciar monitorização da protecção do molde" em tal posição, a partir da qual pode ocorrer uma avaria do molde, se uma peça injectada ficar presa (por exemplo altura da peça + canal de injeção). A medição do curso de protecção Fim de protecção de molde corresponde à posição do molde fechado. [CC100/CC200] Tempo de protecção deve ser um pouco maior que o tempo realmente necessário para atravessar a área de monitorização. [CC100/CC200] Existem 2 tipos de monitorização (de força e de velocidade) sendo este definido na máquina. Na monitorização de força esta não pode ser superior à curva de referência e no caso da monitorização da velocidade esta não pode ser inferior à Força máxima ajustada = 80% da máxima força de protecção do molde. [CC200] Velocidade mínima ajustada = 0,1 mm/s. [CC200] ● Altura do molde, FH: Após a introdução do valor pretendido (input), deve ser ligada a determinação automática da altura do molde. Assim, o molde ficará posicionado onde se pretende, desde que esteja compreendido entre a altura									
ABERTURA DO MOLDE									
● No perfil de velocidades a máquina só permite introduzir 3 velocidades e respectivas posições. [CC100]									
● Ajustar o movimento de abertura tanto quanto possível com a economia de tempo de ciclo e isento de solavancos. [CC100/CC200]									
INJEÇÃO									
● Perfil da velocidade de injeção: Corresponde à velocidade do fuso durante a injeção. Deve ser reduzida a velocidade de injeção antes de entrar na fase de pós-pressão. Isto irá assegurar um ponto de comutação preciso e repetível.									
● Pressão de injeção aumentada: No caso de a pressão máxima não ser suficiente, é ligado este modo que permite a máquina alcançar uma pressão de injeção específica maior. Porém, a velocidade de injeção máxima possível é menor.									
● Limite pressão (específica) injeção, P6: Como ajuste de segurança para o molde, 10% [CC200] ou cerca de 20bar [CC100] acima do valor de pico da pressão de injeção.									
COMUTÇÃO									
● Modo de comutação: curso (C), tempo (T), pressão (P), em paralelo (PAR) [CC100/CC200]									
● Pressão de comutação = Pressão hidráulica = PH. Este modo de comutação é utilizado principalmente quando as oscilações de volume são as principais grandezas de interferência. [CC100/CC200]									
● Comutar em dependência do curso é eficaz quando se tem oscilações na viscosidade e na temperatura. [CC100/CC200]									
● Curso de comutação = Volume injeção = C3. [CC200]									
● Campo de comutação: Este campo é ajustado quando ocorrem picos de pressão no início da injeção, ocasionando uma comutação antecipada. Com isso, a máquina comuta para pós-pressão, somente após alcançar este campo.									
PÓS-PRESSÃO									
● Tempo arrefecimento, Z4: Começa depois da pós-pressão e deve ser grande o suficiente para que a dosagem possa ocorrer na totalidade. [CC100/CC200]									
DOSAGEM									
● Descompressão antes, C4: Começa imediatamente após o fim da pós-pressão para aliviar a pressão da massa fundida no canal de aquecimento e cilindro da massa. Este alívio de compressão corresponde ao recuo do fuso. A velocidade é									
● Descompressão depois, C2: Começa após a dosagem para aliviar a pressão da massa fundida no cilindro e garantir um comportamento de fecho mais uniforme do bloqueio da corrente de retorno durante a injeção. Esta distância é medida									
● Modo descompressão: Antes da dosagem (A), após a dosagem (D), antes e após a dosagem (A&D). [CC100/CC200]									
● Velocidade de alívio = Velocidade de descompressão: Deve ser sincronizada (em caso padrão) com a velocidade de movimento de recuo da rosca na dosagem. [CC100/CC200]									
● Pausa para dosagem = Tempo de atraso para dosagem-Z3: Para materiais termicamente sensíveis a tempos de arrefecimento mais prolongados. Este tempo inicia com o fim da descompressão antes da dosagem. [CC100/CC200]									
● Volume de dosagem: A almofada restante necessária no final da pós-pressão deverá ser de aproximadamente 5 a 10% do curso de dosagem. No caso ideal o curso de dosagem deverá estar na faixa entre 1 e 3 diâmetros de rosca. Caso									
UNIDADE DE INJEÇÃO									
● Tempo de formação da força = Tempo de subir pressão = Z5a: Para que uma força de encosto possa ser formada, é necessário um tempo de formação de força de aproximadamente 0,2 até 0,3s. [CC200]									
● Pressão de encosto do bico, P5: Ajustar de modo a que não ocorra vazamento de material entre o bico e o molde. [CC200] *									
● Força de manutenção na desmoldagem = Pressão de retenção = P5b: Força efectiva com bico encostado sem força de fecho. [CC200]									
● Opção recuo bico: 0 - não, 1 - depois da pausa recuo bico (Z6), 2 - antes da abertura do molde. [CC100]									
● Pressão de retenção, P5b: mínimo = 0, máximo = pressão encosto bico (P5). [CC100]									
● Curso recuo bico (K): mínimo = início 2ª velocidade avanço (J1). [CC100]									
EXTRACÇÃO									
● Início de avanço, A1: mínimo = curso extrator + 5mm, máximo = A(abertura do molde) [CC100]; A1 = Curso de abertura (A), sempre. [CC200]									
● Curso do extrator, L1: mínimo = extrator recuado (L). [CC100]									
● Vibração: Utilizado em peças de difícil desmoldação. [CC100/CC200]									
● Posição vibração, L2: mínimo = extrator recuado (L), máximo = curso extrator (L1). [CC100]									
● Posição do curso do extrator: A medição é feita a partir da posição mecânica recuada do extrator da máquina. [CC200]									
● Posição do extrator atrás e na frente: O curso do extrator resulta da diferença da posição do extrator atrás e da posição do extrator na frente. [CC200]									
● Posição de agitar extrator: O curso do agito é resultado da posição do extrator na frente e da posição de agitar extrator. [CC200] *									
● Posição fim de ciclo: Recuado = O extrator depois dos agitos; Avançado = O extrator fica à frente até ao início do próximo ciclo (para retirar peças injectadas, por exemplo). [CC100/CC200]									
TEMPERATURAS									
● Nas máquinas com controlador CC200 foram definidas 6 regiões com controlo térmico quer nos moldes, quer nos cilindros enquanto que para as máquinas com o controlador CC100 apenas se controlam 5 regiões.									
● Na temperatura da zona de entrada de material, é frequente ajustar para 40°C. [CC100/CC200]									
● As temperaturas inseridas no molde podem ser de aquecimento ou de arrefecimento sendo isto definido na máquina. [CC100]									
SOPRO									
● Função: 0=a válvula de ar está desligada, 1= válvula começa a actuar depois do tempo de pausa(ZLV1) e acaba quando o tempo de sopro(ZL1) terminar(no fecho do molde), 2=válvula começa a actuar depois do tempo de pausa(ZLV1) e acaba									
● Início sopro, A2: mínimo = 0, máximo = A(abertura de molde). [CC100] *									
FLUIDEZ									
● As posições de medição devem ser definidas para que a monitorização do número de fluxo seja feita 0,2 segundos aproximadamente antes de chegar à posição de comutação (C3). [CC100]									
CONTROLADORES DE TEMPERATURA									
● Ponto de medição interno: medição da temperatura do sensor térmico interno que se pode encontrar na ligação de avanço e de recuo. O ponto de medição escolhido é conduzido ao regulador como valor real. [CC100/CC200]									
DRYERS									
● Se existirem parâmetros que não são adequados ao modelo de Dryer em causa, utilizar N.A. (não aplicado) [CC100]									
*: Apesar desta nota ser dada para o modelo indicado, não implica que não possa ser utilizada para ambos.									

Anexo D: *Bill of Process*

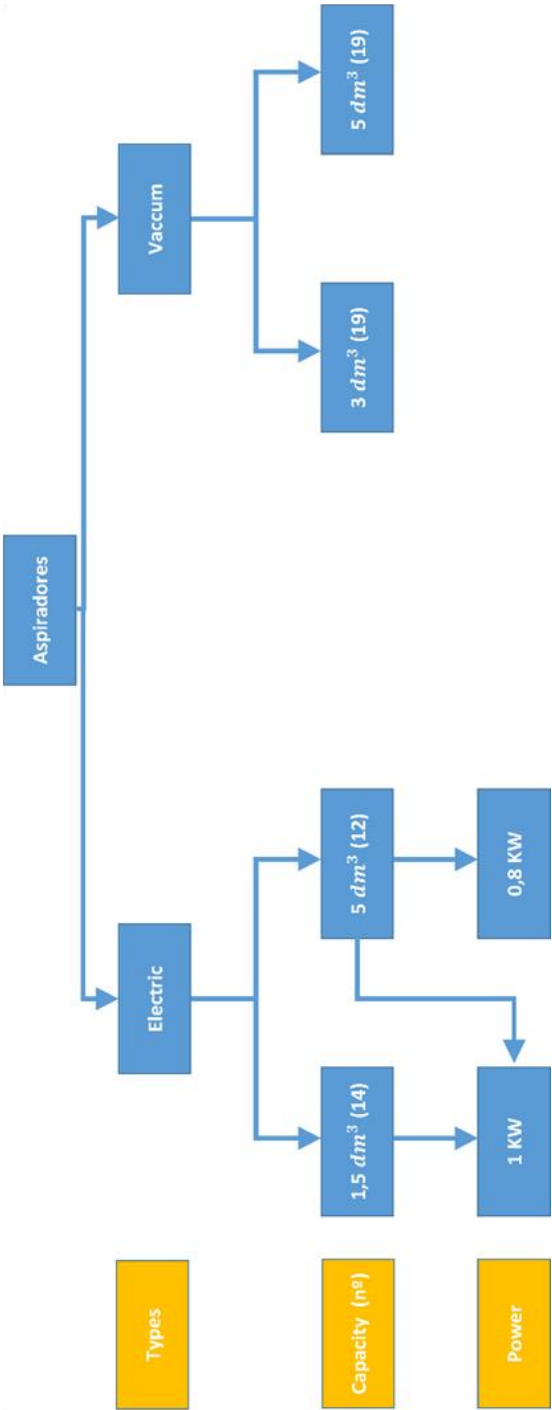
Bill of Process

Hopper Loaders (Aspiradores)

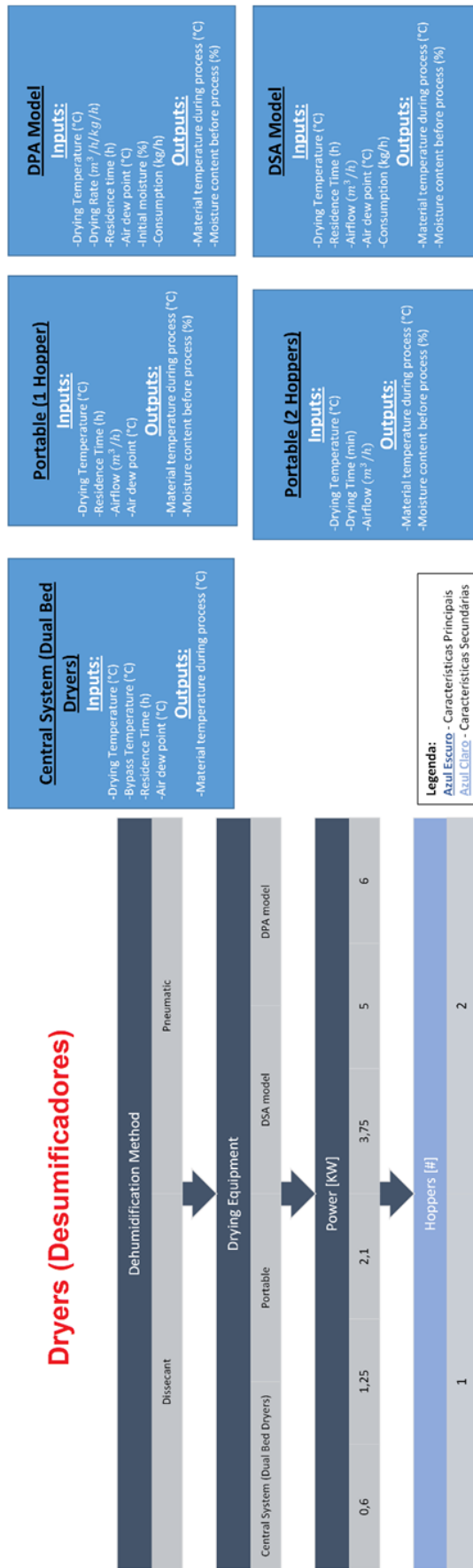
Type	Vaccum	
Electric	3	5
Capacity [dm^3]	1,5	
Power [KW]	0,8	1

Electric Hopper Loaders	Vaccum Hopper Loaders
Inputs: <ul style="list-style-type: none"> - Loading time (s) - Idle time (s) - Compressed air consumption (NI/cycle) - Compressed air pressure (bar) Outputs: <ul style="list-style-type: none"> -Flow of material conveyed (kg/h) -Transport/Reaching distance (m) 	Inputs: <ul style="list-style-type: none"> - Conveying time (s) - Pause time between loading cycles (s) - Compressed air consumption (NI/cycle) - Compressed air pressure (bar) Outputs: <ul style="list-style-type: none"> -Flow of material conveyed (kg/h) -Transport/Reaching distance (m)

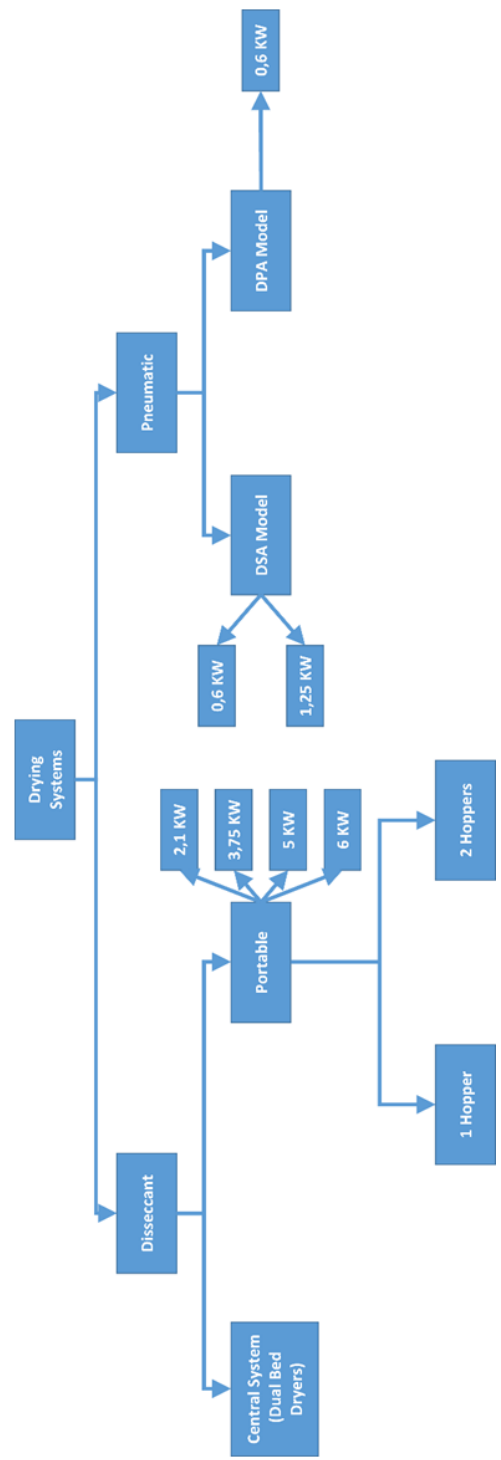
Nota:
 Loading time = Conveying time
 Idle time = Pause time between loading cycles



Dryers (Desumificadores)



Legenda:
 Azul Escuro - Características Principais
 Azul Claro - Características Secundárias

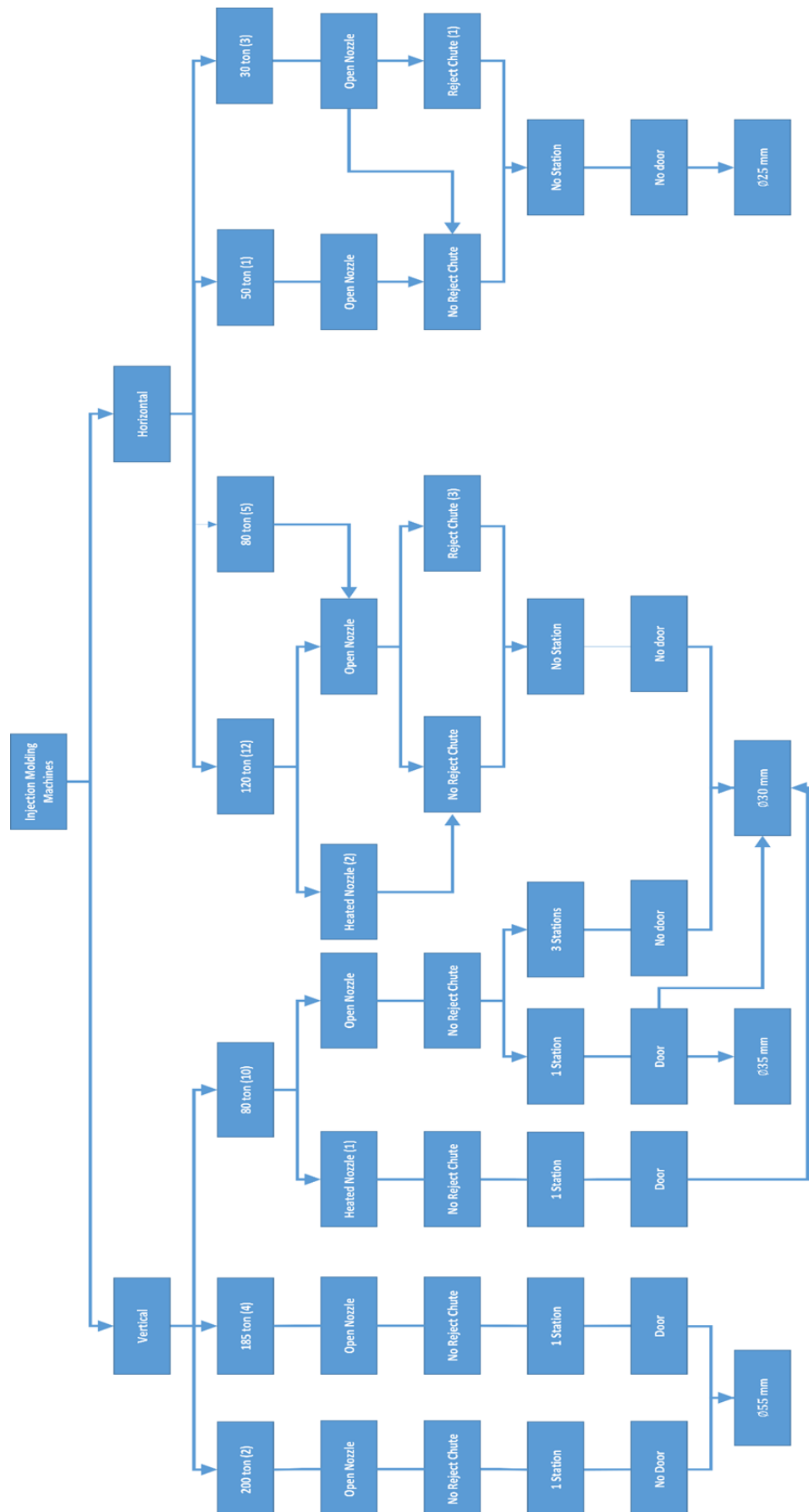


ENGEL ES 1000H/185V SOTR : ENGEL ES 200/30 HL HS : ENGEL ES 200/50 HL : ENGEL ES 330/80 HL : ENGEL ES 330H/80V SO-TR : ENGEL ES 700H/185V SOTR : ENGEL ES 80/30 HL	Inputs:	
	Clamp unit:	
-Mould closing speed profile ($\frac{mm}{s}$)		
-Mould protection: stroke(mm), pressure(bar), end(mm), time act(s), max. force(kN)		
-Mould height setting(mm)		
-Clamping: force(kN), pressure(bar)		
-Mould opening speed profile ($\frac{mm}{s}$)		
-Mould opening stroke (mm)		
Air valve:		
-Air blowing: start(mm), delay time(s), time act(s)		
Injection:		
-Injection speed profile ($\frac{cm^3}{s}$)		
-Injection: pressure limit(bar)		
Switchover:		
-Switchover: stroke(mm), time act(s), pressure(bar)		
Holding pressure		
-Post injection pressure profile (bar/s)		
-Post injection pressure time(s)		
-Cooling time(s)		
Plasticizing		
-Plasticizing speed profile ($\frac{cm^3}{cm^3}$)		
-Plasticizing: stroke(mm), delay time(s), volume (cm^3)		
-Back pressure: stroke before plast. (cm^3)		
-Decompression: stroke before plast. (mm), stroke after plast. (mm), speed(%)		
Injection unit:		
-Nozzle: forward speed profile($\frac{mm}{s}$), return speed profile($\frac{mm}{s}$), return stroke(mm), contact force(kN), contact pressure(bar), contact pressure build up time(s), holding pressure at demoulding(bar), demoulding force(kN), return delay(s)		
Ejector:		
-Ejector: initial position(mm), rear(mm), stroke(mm), shake position(mm), speed forward profile($\frac{mm}{s}$), speed return profile($\frac{mm}{s}$), force forward profile(kN/mm), force return profile(kN/mm), forward delay(s), return delay(s), end position(mm), pressure forward(bar), pressure return(bar), new cycle time(s)		
-Start ejector forward(mm)		
Temperature:		
-Nozzle		
-Cylinder		
-Mould		
-Traverse(feed section)		
-Oil temperature		
Viscosity measurement:		
-Flow number set value(bar)		
-Measuring: start(mm), stop(mm)		

Machine/Mould (Máquina/Molde)

Vertical		Horizontal	
300		500	
25		30	
2		4	
Yes		No	
Yes		No	
No		No	
Open Nozzle		Nozzle	

Legend:
Green: Characteristics Principles
Red: Details, Characteristics and Parameters



Temperature control units (Termorreguladores)

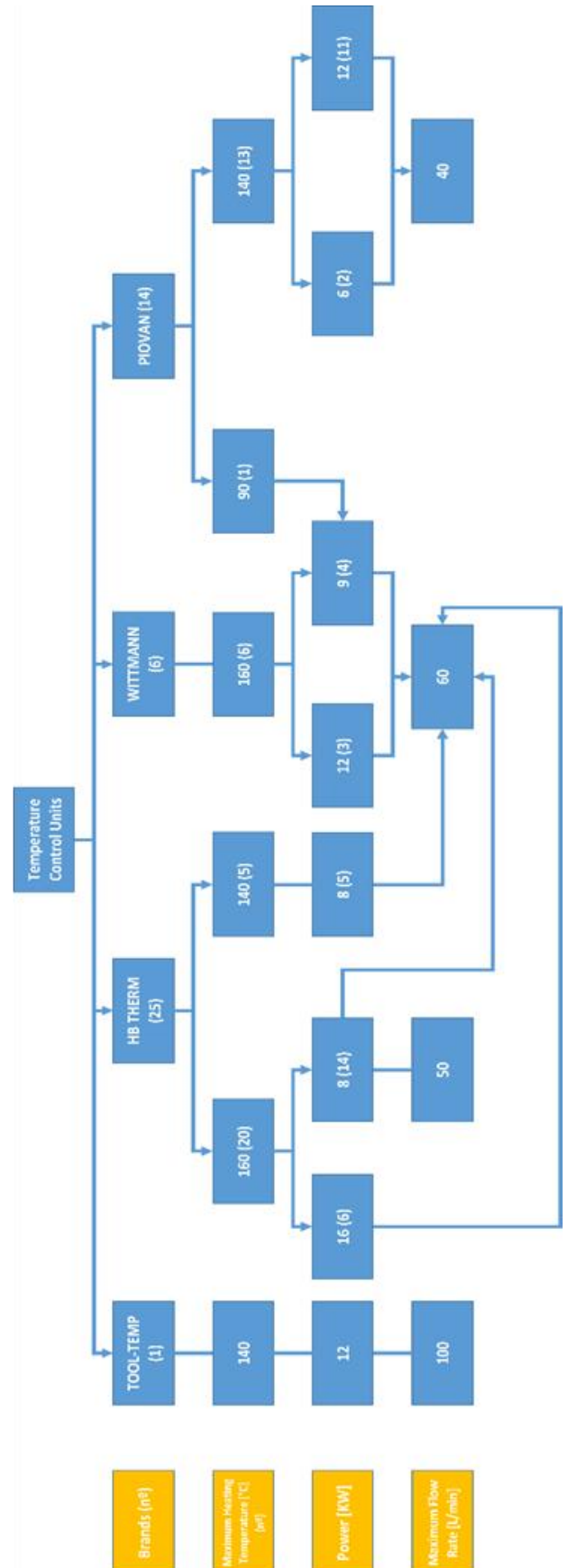
Brand			
HB-THERM	PIOVAN	WITTMANN	TOOL-TEMP
Power [KW]			
6	8	9	12
			16
Maximum Temperature [°C]			
90	140	160	
Maximum Pump Flow Rate [L/min]			
40	50	60	100
Flow rate meter			
Yes		No	

WITTMANN
Inputs:
 - Set temperature (°C)
 - Flow rate (L/min)
Outputs:
 - Real temperature of the process fluid (°C)
 - Flow rate during process (L/min)

HB-THERM
Inputs:
 - Set temperature (°C)
 - Flow rate (L/min)
Outputs:
 - Main line temperature (°C)
 - Return line temperature (°C)
 - Process power (KW)
 - Pump pressure (bar)
 - Flow rate during process (L/min)

TOOL-TEMP
Inputs:
 - Set temperature (°C)
Outputs:
 - Real temperature of the process fluid (°C)
 - Pump pressure (bar/psi)

PIOVAN
Inputs:
 - Set temperature (°C)
 - Set minimum flow level (L/min)
Outputs:
 - Real temperature of the process fluid (°C)



Anexo E: Folha de *Setup* máquinas recentes (Frente)

Anexo F: Folha de *Setup* máquinas antigas (Frente)

Anexo G: Folha de *Setup* máquinas recentes e antigas (Verso)

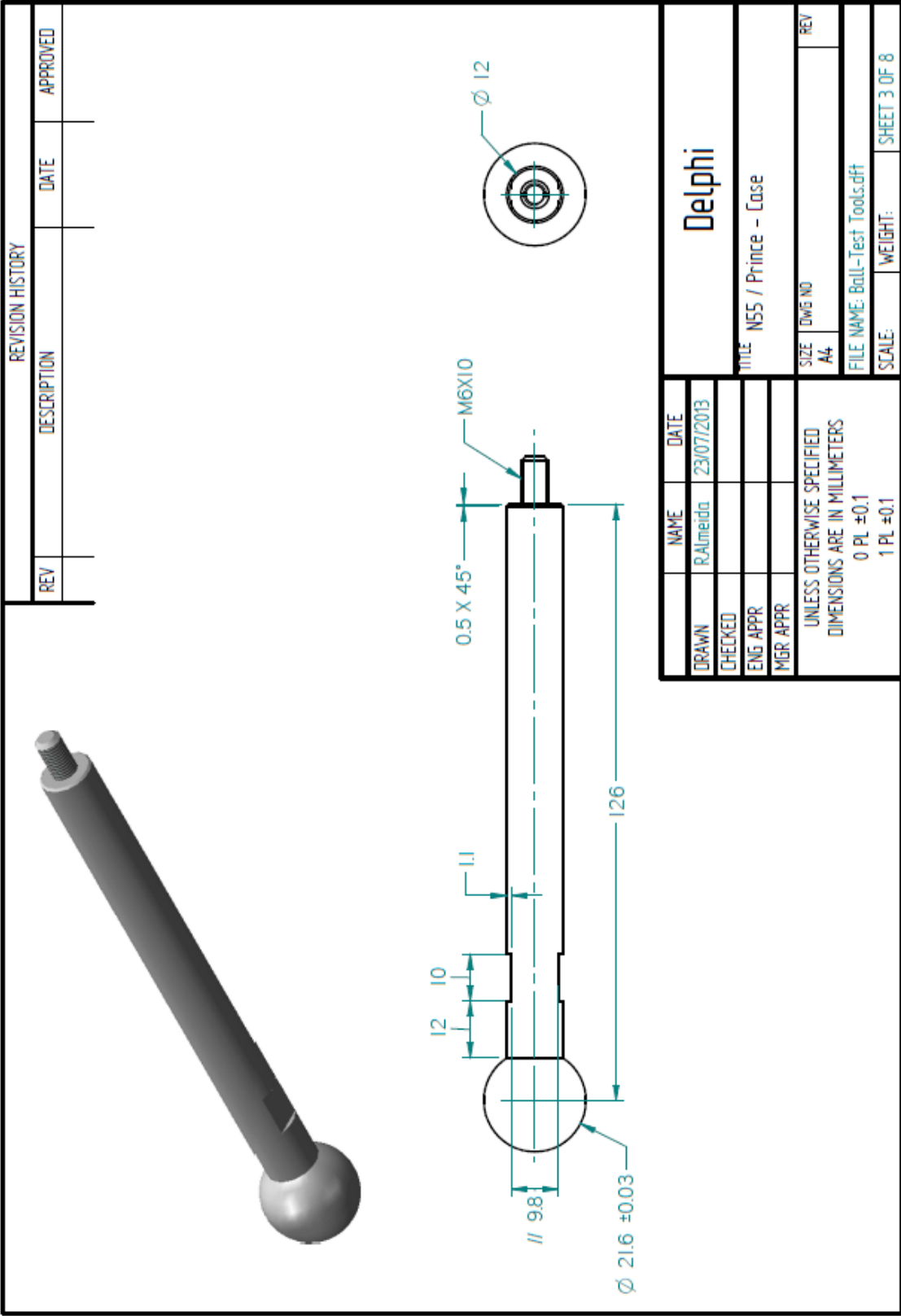
Anexo H: Desenho da peça

Anexo I: Dimensões CMM e massa das peças (DOE)

Cav	Peça	QCI-3_1 (mm)	QCI-3_2 (mm)	QCI-3_3 (mm)	QCI-3_4 (mm)	QCI-3 média (mm)	QCI-4 (mm)	QCI-5 (mm)	QCI-10/massa (g)	QCI-11 (mm)	QCI-12 (mm)	KPC-1 (mm)
Cav 12	P1.1	1,0205	0,89	0,9609	1,0436	0,97885	121,2073	23,1513	13,8291	26,1084	28,8599	9,1995
	P1.2	1,0161	0,8953	0,9664	1,0376	0,97885	121,1763	23,1523	13,3367	26,1189	27,8233	9,9561
	P1.3	1,0161	0,9008	0,9682	1,0331	0,97955	121,2064	23,1549	13,8543	26,1383	28,4543	9,1893
	P2.1	1,0206	0,8878	0,9598	1,0453	0,978375	121,1819	23,152	13,8164	26,1427	28,4844	9,1977
	P2.2	1,0172	0,8928	0,9636	1,038	0,9779	121,184	23,1528	13,813	26,1204	28,5053	9,1945
	P2.3	1,0174	0,8974	0,9635	1,0338	0,978025	121,1772	23,1538	13,8133	26,1473	28,4815	9,1982
	P3.1	1,0264	0,8932	0,9647	1,0471	0,98285	121,2135	23,1694	13,8749	26,268	28,5737	9,1978
	P3.2	1,0201	0,8975	0,9691	1,0442	0,982725	121,2045	23,1665	13,8745	26,1649	29,0276	9,204
	P3.3	1,0211	0,8996	0,9729	1,0404	0,9835	121,2119	23,1677	13,8797	26,1239	28,8633	9,1983
	P4.1	1,026	0,895	0,967	1,0455	0,983375	121,2076	23,1697	13,876	26,1337	28,5762	9,1982
	P4.2	1,0201	0,8975	0,9691	1,0442	0,982725	121,2045	23,1665	13,8772	26,1649	29,0276	9,204
	P4.3	1,0214	0,9007	0,969	1,0403	0,98285	121,201	23,1684	13,8791	26,1269	28,4965	9,1975
	P5.1	1,022	0,8935	0,9638	1,045	0,981075	121,2023	23,1599	13,832	26,1243	28,8176	9,1942
	P5.2	1,0192	0,8979	0,967	1,0371	0,9803	121,2049	23,16	13,8307	26,2195	29,0724	9,2029
	P5.3	1,0173	0,8985	0,9667	1,0392	0,980425	121,2015	23,1591	13,3475	26,1299	27,8791	9,9263
	P6.1	1,0212	0,8929	0,9625	1,0436	0,98005	121,1983	23,1599	13,8355	26,3731	28,4632	9,2018
	P6.2	1,0173	0,8966	0,9683	1,038	0,98005	121,1738	23,1588	13,8376	26,1357	28,4605	9,1998
	P6.3	1,0171	0,8965	0,9695	1,0392	0,980575	121,1932	23,1591	13,8333	26,1188	28,4666	9,2023
	P7.1	1,018	0,8889	0,9593	1,0404	0,97665	121,1878	23,1495	13,7719	26,117	28,6384	9,1888
	P7.2	1,017	0,895	0,9641	1,0363	0,9781	121,1865	23,1507	13,7752	26,1558	28,6497	9,1894
	P7.3	1,0156	0,8934	0,9614	1,0339	0,976075	121,1715	23,1472	13,7702	26,1492	28,6578	9,1927
	P8.1	1,0232	0,8954	0,966	1,0494	0,9835	121,215	23,1671	13,8899	26,2084	28,573	9,1925
	P8.2	1,0218	0,8995	0,9703	1,0416	0,9833	121,2047	23,1694	13,8925	26,1341	28,5667	9,1955
	P8.3	1,0227	0,8995	0,9706	1,0435	0,984075	121,203	23,1697	13,8876	26,1272	28,564	9,194
	P9.1	1,0199	0,8949	0,9659	1,0426	0,980825	121,1881	23,161	13,8382	26,1198	28,6063	9,1929
	P9.2	1,0202	0,8948	0,9668	1,0403	0,980525	121,186	23,1599	13,8376	26,2666	28,6072	9,1926
	P9.3	1,019	0,8979	0,9669	1,0402	0,981	121,1946	23,1612	13,8363	26,1768	28,6593	9,1968
	P10.1	1,0203	0,8911	0,966	1,0433	0,980175	121,1888	23,1603	13,83	26,1142	28,5971	9,1919
	P10.2	1,0193	0,8983	0,9682	1,0404	0,98155	121,1677	23,1619	13,8278	26,1204	28,9977	9,2056
	P10.3	1,019	0,8979	0,9669	1,0402	0,981	121,1946	23,1612	13,8326	26,1768	28,6593	9,1968
	P11.1	1,0181	0,8939	0,9667	1,0436	0,980575	121,1975	23,1596	13,8331	26,1269	28,5728	9,195
	P11.2	1,0183	0,909	0,9722	1,0423	0,98545	121,2942	23,1614	13,8298	26,3139	28,5955	9,1425
	P11.3	1,0183	0,8976	0,9656	1,0373	0,9797	121,209	23,1597	13,8313	26,1296	28,5968	9,1922
	P12.1	1,0174	0,8921	0,9679	1,0435	0,980225	121,1796	23,1597	13,8343	26,1255	28,6133	9,1931
	P12.2	1,0195	0,8966	0,9668	1,04	0,980775	121,1911	23,1609	13,8368	26,1141	28,6254	9,1923
	P12.3	1,0204	0,8979	0,9663	1,0408	0,98135	121,1847	23,1625	13,8303	26,2467	28,5935	9,1914
	P13.1	1,0178	0,8923	0,9655	1,0436	0,9798	121,1865	23,1599	13,8279	26,1215	28,5756	9,1922
	P13.2	1,0187	0,8965	0,9674	1,0413	0,980975	121,1926	23,1613	13,8355	26,1165	28,6563	9,1954
	P13.3	1,022	0,8944	0,9651	1,0442	0,981425	121,1885	23,1631	13,8342	26,2064	28,6326	9,194

Cav	Peça	QCI-3_1 (mm)	QCI-3_2 (mm)	QCI-3_3 (mm)	QCI-3_4 (mm)	QCI-3 média (mm)	QCI-4 (mm)	QCI-5 (mm)	QCI-10/massa (g)	QCI-11 (mm)	QCI-12 (mm)	KPC-1 (mm)
Cav 13	P1.1	1,0398	0,953	0,9306	0,9903	0,978425	121,1463	23,1561	13,8029	26,115	28,8645	9,2001
	P1.2	1,0358	0,9583	0,9335	0,9845	0,978025	121,1547	23,1563	13,8071	26,1164	30,9125	9,1939
	P1.3	1,0413	0,9678	0,9374	0,9906	0,984275	121,1598	23,1678	13,3304	26,166	27,7208	9,9637
	P2.1	1,041	0,9517	0,9298	0,9891	0,9779	121,1525	23,1567	13,7898	26,1168	28,4441	9,2009
	P2.2	1,0386	0,9573	0,9328	0,9845	0,9783	121,1553	23,1567	13,7864	26,1244	28,45	9,2002
	P2.3	1,0382	0,9592	0,9345	0,9849	0,9792	121,1607	23,1594	13,7872	26,1224	28,4594	9,201
	P3.1	1,0445	0,9592	0,9345	0,9918	0,9825	121,1593	23,1711	13,846	26,116	28,4661	9,202
	P3.2	1,04	0,9626	0,9372	0,9867	0,981625	121,1684	23,1657	13,8464	26,1382	28,8409	9,2011
	P3.3	1,0411	0,967	0,939	0,985	0,983025	121,1707	23,1726	13,8495	26,1232	28,8295	9,2007
	P4.1	1,0442	0,9603	0,9353	0,988	0,98195	121,1668	23,1699	13,8464	26,1018	28,4659	9,202
	P4.2	1,0422	0,9616	0,9361	0,9873	0,9818	121,1564	23,1671	13,8475	26,1243	28,4571	9,2019
	P4.3	1,0403	0,9653	0,9397	0,9846	0,982475	121,1668	23,1701	13,8474	26,1233	28,468	9,2018
	P5.1	1,041	0,957	0,9335	0,9869	0,9796	121,1489	23,1618	13,8048	26,1235	29,0182	9,2027
	P5.2	1,0412	0,9617	0,9342	0,9883	0,98135	121,1592	23,1637	13,8033	26,201	28,9816	9,2005
	P5.3	1,0401	0,9642	0,9357	0,9808	0,9802	121,1698	23,1589	13,8024	26,1253	29,0663	9,2053
	P6.1	1,0415	0,9591	0,9329	0,9864	0,979975	121,1637	23,1623	13,803	26,2289	28,4239	9,2012
	P6.2	1,0438	0,9509	0,9245	0,9993	0,979625	121,136	23,1607	13,8058	26,1263	28,4182	9,2016
	P6.3	1,0428	0,9653	0,9344	0,9842	0,981675	121,1505	23,1655	13,8015	26,2063	28,4308	9,2014
	P7.1	1,038	0,9542	0,9293	0,9841	0,9764	121,1526	23,15	13,7398	26,1249	28,5561	9,1915
	P7.2	1,0352	0,9597	0,9312	0,9768	0,975725	121,1316	23,149	13,7396	26,1354	28,6068	9,1921
	P7.3	1,0344	0,9613	0,9316	0,9774	0,976175	121,1464	23,1507	13,7413	26,1289	28,5663	9,1927
	P8.1	1,0441	0,9644	0,9364	0,9882	0,983275	121,1806	23,1721	13,8575	26,3209	28,5693	9,1956
	P8.2	1,0378	0,9675	0,9403	0,9857	0,982825	121,1754	23,1694	13,8567	26,1241	28,6779	9,2004
	P8.3	1,0425	0,9653	0,9388	0,9837	0,982575	121,1701	23,1712	13,8556	26,1226	28,5632	9,1957
	P9.1	1,0411	0,96	0,9336	0,9875	0,98055	121,1643	23,1636	13,8051	26,1297	28,635	9,1929
	P9.2	1,0369	0,9643	0,9359	0,9804	0,979375	121,1489	23,1623	13,8062	26,1243	28,8329	9,2003
	P9.3	1,0393	0,9653	0,9365	0,9836	0,981175	121,155	23,1642	13,8029	26,1239	28,5845	9,1932
	P10.1	1,0392	0,9596	0,9342	0,9851	0,979525	121,1454	23,1607	13,7953	26,1255	28,7795	9,1989
	P10.2	1,0371	0,9635	0,936	0,9811	0,979425	121,1624	23,1622	13,7996	26,1239	28,6078	9,1964
	P10.3	1,0415	0,9636	0,9337	0,9875	0,981575	121,1416	23,1651	13,8035	26,1297	28,6139	9,1936
	P11.1	1,0376	0,9613	0,9353	0,9873	0,980375	121,1384	23,1626	13,8012	26,1283	28,6411	9,1942
	P11.2	1,0387	0,9648	0,9354	0,9842	0,980775	121,1603	23,1626	13,8024	26,1154	28,5629	9,196
	P11.3	1,0446	0,9613	0,9306	0,9927	0,9823	121,1564	23,1667	13,7998	26,2719	28,5941	9,1934
	P12.1	1,038	0,9607	0,936	0,9839	0,97965	121,1627	23,1598	13,8039	26,1261	28,5418	9,1945
	P12.2	1,0379	0,9646	0,9381	0,9802	0,9802	121,141	23,1628	13,8037	26,1341	28,589	9,1966
	P12.3	1,0375	0,9634	0,9367	0,9835	0,980275	121,1591	23,1627	13,7993	26,1227	28,6983	9,1939
	P13.1	1,0382	0,9597	0,9356	0,9882	0,980425	121,1515	23,1624	13,7997	26,131	28,5568	9,1974
	P13.2	1,0435	0,962	0,9324	0,993	0,982725	121,1543	23,166	13,8025	26,2596	28,5316	9,1942
	P13.3	1,0385	0,962	0,9377	0,9837	0,980475	121,1629	23,1625	13,8007	26,1379	28,5403	9,1963

Anexo J: Desenho do punção *Ball Test*



Anexo K: Factores e Respostas dos ensaios

Cavidade 12		Factores				Respostas											
		Pós Pressão				F _b [N]	S _b [mm]	F _{max} [N]	W [Nmm]	QCI3 [mm]	QCI4 [mm]	QCI6 [mm]	QCI11 [mm]	QCI12 [mm]	KPC1 [mm]	m [g]	
		t	t [s]	P	P [bar]												
Réplica	#Ensaio	t	t [s]	P	P [bar]	F _b [N]	S _b [mm]	F _{max} [N]	W [Nmm]	QCI3 [mm]	QCI4 [mm]	QCI6 [mm]	QCI11 [mm]	QCI12 [mm]	KPC1 [mm]	m [g]	
1	1	-1	2,9	-1	72,9	205,442	60,4247	214,173	5446,94	0,97875	121,21	23,151	26,108	28,86	9,1995	13,829	
	2	1	4,6	-1	72,9	190,601	60,6311	203,776	5313,75	0,978375	121,18	23,152	26,143	28,484	9,1977	13,816	
	3	-1	2,9	1	87,1	203,773	60,4329	208,789	5223,74	0,98285	121,21	23,169	26,268	28,574	9,1978	13,875	
	4	1	4,6	1	87,1	205,807	60,4752	215,179	5298,02	0,983375	121,21	23,17	26,134	28,576	9,1982	13,876	
	5	-1,414	2,5	0	80	193,794	60,5564	201,071	5072,1	0,981075	121,2	23,16	26,124	28,818	9,1942	13,832	
	6	1,414	5	0	80	217,4	61,231	242,578	5913,83	0,98005	121,2	23,16	26,373	28,463	9,2018	13,836	
	7	0	3,75	-1,414	70	206,522	60,9003	218,947	5171,36	0,97665	121,19	23,15	26,117	28,638	9,1888	13,772	
	8	0	3,75	1,414	90	188,269	60,3482	194	4853,25	0,9835	121,22	23,167	26,208	28,573	9,1925	13,89	
	9	0	3,75	0	80	303,372	59,6648	314,804	7936,75	0,980825	121,19	23,161	26,12	28,606	9,1929	13,838	
	10	0	3,75	0	80	184,22	61,8814	205,195	5454,5	0,980175	121,19	23,16	26,114	28,597	9,1919	13,83	
	11	0	3,75	0	80	192,759	61,4915	216,993	5417,49	0,980575	121,2	23,16	26,127	28,573	9,195	13,833	
	12	0	3,75	0	80	196,452	60,8246	208,991	5292,07	0,980225	121,18	23,16	26,126	28,613	9,1931	13,834	
	13	0	3,75	0	80	192,513	61,1082	208,349	5365,56	0,9798	121,19	23,16	26,122	28,576	9,1922	13,828	
2	14	-1	2,9	-1	72,9	214,713	60,7501	225,108	5631,12	0,97885	121,18	23,152	26,119	27,823	9,9561	13,337	
	15	1	4,6	-1	72,9	202,077	60,398	210,434	5443,26	0,9779	121,18	23,153	26,12	28,505	9,1945	13,813	
	16	-1	2,9	1	87,1	190,412	60,4226	194,993	4894,51	0,982725	121,2	23,167	26,165	29,028	9,204	13,875	
	17	1	4,6	1	87,1	216,4	60,8416	226,742	5619,36	0,982725	121,2	23,167	26,165	29,028	9,204	13,877	
	18	-1,414	2,5	0	80	183,249	60,7317	194,185	4932,34	0,9803	121,2	23,16	26,22	29,072	9,2029	13,831	
	19	1,414	5	0	80	181,857	61,0979	200,105	5174,64	0,98005	121,17	23,159	26,136	28,461	9,1998	13,838	
	20	0	3,75	-1,414	70	197,805	60,5837	209,904	5404,49	0,9781	121,19	23,151	26,156	28,65	9,1894	13,775	
	21	0	3,75	1,414	90	190,939	60,6147	198,805	4995,87	0,9833	121,2	23,169	26,134	28,567	9,1955	13,893	
	22	0	3,75	0	80	192,683	60,464	202,727	5106,74	0,980525	121,19	23,16	26,267	28,607	9,1926	13,838	
	23	0	3,75	0	80	224,379	60,8832	253,598	6659,21	0,98155	121,17	23,162	26,12	28,998	9,2056	13,828	
	24	0	3,75	0	80	205,293	60,542	214,898	5393,88	0,98545	121,29	23,161	26,314	28,596	9,1425	13,83	
	25	0	3,75	0	80	187,566	60,5813	202,639	5109,3	0,980725	121,19	23,161	26,114	28,625	9,1923	13,837	
	26	0	3,75	0	80	192,5	56,4246	193,892	4433,87	0,980975	121,19	23,161	26,117	28,656	9,1954	13,836	
3	27	-1	2,9	-1	72,9	196,789	60,4477	206,732	5188,69	0,97955	121,21	23,155	26,138	28,454	9,1893	13,854	
	28	1	4,6	-1	72,9	197,681	59,2226	199,969	4921,17	0,978025	121,18	23,154	26,147	28,482	9,1982	13,813	
	29	-1	2,9	1	87,1	196,022	60,9669	205,675	5291,64	0,9835	121,21	23,168	26,124	28,863	9,1983	13,88	
	30	1	4,6	1	87,1	184	61,0145	196,337	5025,35	0,98285	121,2	23,168	26,127	28,497	9,1975	13,879	
	31	-1,414	2,5	0	80	185,779	59,3652	194,8	4709,92	0,980425	121,2	23,159	26,13	27,879	9,9263	13,348	
	32	1,414	5	0	80	186,13	60,973	200,443	5173,9	0,980575	121,19	23,159	26,119	28,467	9,2023	13,833	
	33	0	3,75	-1,414	70	191,036	60,9814	206,728	5290,61	0,976075	121,17	23,147	26,149	28,658	9,1927	13,77	
	34	0	3,75	1,414	90	193,829	59,9481	199,986	4925,09	0,984075	121,2	23,17	26,127	28,564	9,194	13,888	
	35	0	3,75	0	80	189,483	60,9916	203,624	5269,3	0,981	121,19	23,161	26,177	28,659	9,1968	13,836	
	36	0	3,75	0	80	187,294	60,1396	197,874	4921,12	0,981	121,19	23,161	26,177	28,659	9,1968	13,833	
	37	0	3,75	0	80	205,349	61,3898	221,137	5519,68	0,9797	121,19	23,16	26,13	28,597	9,1922	13,831	
	38	0	3,75	0	80	194,269	61,1085	206,399	5307,25	0,98135	121,18	23,163	26,247	28,594	9,1914	13,83	
	39	0	3,75	0	80	190,97	60,9234	203,368	5291,35	0,981425	121,19	23,163	26,206	28,633	9,194	13,834	

Cavidade 13			Factores				Respostas												
			Pós Pressão																
			t	t [s]	P	P [bar]	F ₀ [N]	S _b [mm]	F _{max} [N]	W [Nmm]	QC13 [mm]	QC14 [mm]	QC16 [mm]	QC111 [mm]	QC112 [mm]	KPC1 [mm]	m [g]		
1	Réplica	#Ensaio																	
		1	-1	2,9	-1	72,9	192,328	60,7503	203,255	5235,05	0,978425	121,1463	23,1561	26,115	28,8645	9,2001	13,8029		
		2	1	4,6	-1	72,9	180,089	60,7834	199,698	5105,3	0,9779	121,1525	23,1567	26,1168	28,4441	9,2009	13,7898		
		3	-1	2,9	1	87,1	182,323	61,298	198,041	5122,35	0,9825	121,1593	23,1711	26,116	28,4661	9,202	13,846		
		4	1	4,6	1	87,1	191,626	60,9589	203	5218,86	0,98195	121,1668	23,1699	26,1018	28,4659	9,202	13,8464		
		5	-1,414	2,5	0	80	185,999	60,5567	191,001	4839,65	0,9796	121,1489	23,1618	26,1235	29,0182	9,2027	13,8048		
		6	1,414	5	0	80	230,008	60,6981	248,225	5813,8	0,979975	121,1637	23,1623	26,2289	28,4239	9,2012	13,803		
		7	0	3,75	-1,414	70	190,238	60,3833	202,28	5068,78	0,9764	121,1526	23,15	26,1249	28,5561	9,1915	13,7398		
		8	0	3,75	1,414	90	182,859	60,79	190,654	4792,89	0,983275	121,1806	23,1721	26,3209	28,5693	9,1956	13,8575		
		9	0	3,75	0	80	182,2	60,7231	190,232	4844,66	0,98055	121,1643	23,1636	26,1297	28,635	9,1929	13,8051		
		10	0	3,75	0	80	197,484	60,2165	199,39	5132,88	0,979525	121,1454	23,1607	26,1255	28,7795	9,1989	13,7953		
		11	0	3,75	0	80	199,891	60,942	214,744	5544,24	0,980375	121,1384	23,1626	26,1283	28,6411	9,1942	13,8012		
2		12	0	3,75	0	80	180,172	60,8336	195,886	5094,48	0,97965	121,1627	23,1598	26,1261	28,5418	9,1945	13,8039		
		13	0	3,75	0	80	182,143	60,5978	189,477	4797,74	0,980425	121,1515	23,1624	26,131	28,5568	9,1974	13,7997		
		14	-1	2,9	-1	72,9	191,758	61,2164	212,188	5499,24	0,978025	121,1547	23,1563	26,1164	30,9125	9,1939	13,8071		
		15	1	4,6	-1	72,9	194,226	60,5416	201,231	5155,04	0,9783	121,1553	23,1567	26,1244	28,45	9,2002	13,7864		
		16	-1	2,9	1	87,1	198,301	60,6498	204,924	5152,31	0,981625	121,1684	23,1657	26,1382	28,8409	9,2011	13,8464		
		17	1	4,6	1	87,1	192,93	61,0498	206,149	5426,25	0,9818	121,1564	23,1671	26,1243	28,4571	9,2019	13,8475		
		18	-1,414	2,5	0	80	189,885	60,5066	195,52	4990,84	0,98135	121,1592	23,1637	26,201	28,9816	9,2005	13,8033		
		19	1,414	5	0	80	185,662	53,4416	197,238	5194,39	0,979625	121,136	23,1607	26,1263	28,4182	9,2016	13,8058		
		20	0	3,75	-1,414	70	202,147	61,2146	219,516	5325,65	0,975725	121,1316	23,149	26,1354	28,6068	9,1921	13,7996		
		21	0	3,75	1,414	90	187,717	61,2167	203,787	5171,28	0,982825	121,1754	23,1694	26,1241	28,6779	9,2004	13,8567		
		22	0	3,75	0	80	176,776	61,2981	191,075	4998,64	0,979375	121,1489	23,1623	26,1243	28,8329	9,2003	13,8062		
		23	0	3,75	0	80	175,024	61,0897	188,098	4860,05	0,979425	121,1624	23,1622	26,1239	28,6078	9,1964	13,7996		
3		24	0	3,75	0	80	186,32	60,9585	202,03	5337,19	0,980775	121,1603	23,1626	26,1154	28,5629	9,196	13,8024		
		25	0	3,75	0	80	199,926	60,5419	209,246	5276,75	0,9802	121,141	23,1628	26,1341	28,589	9,1966	13,8037		
		26	0	3,75	0	80	193,571	60,7916	206,123	5363,59	0,982725	121,1543	23,166	26,2596	28,5316	9,1942	13,8025		
		27	-1	2,9	-1	72,9	225,618	60,2663	226,76	5865,57	0,984275	121,1598	23,1678	26,166	27,7208	9,9637	13,3304		
		28	1	4,6	-1	72,9	181,888	61,1728	192,885	5063,8	0,9792	121,1607	23,1594	26,1224	28,4594	9,201	13,7872		
		29	-1	2,9	1	87,1	184,005	60,5649	191,168	4798,81	0,983025	121,1707	23,1726	26,1232	28,8295	9,2007	13,8495		
		30	1	4,6	1	87,1	177,022	61,14	192,332	4898,9	0,982475	121,1668	23,1701	26,1233	28,468	9,2018	13,8474		
		31	-1,414	2,5	0	80	181,444	61,1979	191,927	4976,63	0,9802	121,1698	23,1589	26,1253	29,0663	9,2053	13,8024		
		32	1,414	5	0	80	201,024	60,2581	202,46	5078,44	0,981675	121,1505	23,1655	26,2063	28,4308	9,2014	13,8015		
		33	0	3,75	-1,414	70	177,312	60,9481	197,764	5082,22	0,976175	121,1464	23,1507	26,1289	28,5663	9,1927	13,7413		
		34	0	3,75	1,414	90	186,047	61,4644	206,003	5177,45	0,982575	121,1701	23,1712	26,1226	28,5632	9,1957	13,8556		
		35	0	3,75	0	80	196,65	60,9917	211,402	5698,9	0,981175	121,155	23,1642	26,1239	28,5845	9,1932	13,8029		
		36	0	3,75	0	80	222,061	61,1336	235,68	5864,81	0,981575	121,1416	23,1651	26,1297	28,6139	9,1936	13,8035		
		37	0	3,75	0	80	189,728	60,6165	200,014	5100,44	0,9823	121,1564	23,1667	26,2719	28,5941	9,1934	13,7998		
		38	0	3,75	0	80	175,275	61,0499	195,969	5028,55	0,980275	121,1591	23,1627	26,1227	28,6983	9,1939	13,7993		
		39	0	3,75	0	80	190,739	61,1419	203,321	5252,99	0,980475	121,1629	23,1625	26,1379	28,5403	9,1963	13,8007		

Anexo L: Validação *N55 Case#6 PLT461*

PARÂMETROS DE CONTROLE (OUTPUTS)				Unid./Ref.		
	Unid.	Ref.	Min.	Max.		
Cilindro	1ª Temp. [Bico] (H1s)	°C	288	292		
	2ª Temp. [Cilindro] (H2x)	°C	283	287		
	3ª Temp. [Cilindro] (H3x)	°C	278	282		
	4ª Temp. [Cilindro] (H4x)	°C	273	277		
	5ª Temp. [Cilindro] (H5x)	°C	N.A.	N.A.		
	6ª Temp. [Zona Alm. Mol.] (H6x)	°C	N.A.	N.A.		
Molde	1ª Temp. Molde (H7x)	°C	N.A.	N.A.		
	2ª Temp. Molde (H8x)	°C	N.A.	N.A.		
	3ª Temp. Molde (H9x)	°C	N.A.	N.A.		
	4ª Temp. Molde (H10x)	°C	N.A.	N.A.		
	5ª Temp. Molde (H11x)	°C	N.A.	N.A.		
	6ª Temp. Molde (H12x)	°C	N.A.	N.A.		
Mão	Temp. Mão (H13x)	°C	75	60		
CURSOS	Curso Total Dosagem (S5x)	mm	45	50		
	Posição Real Comutação (C3u)	mm	7,5	12		
	Almofada (CPx)	mm	1	5		
	Voluma Dosagem (V5x)	mm		32		
PRESSIONES	Pico de pressão de injeção (P1v)	bar	85	143		
	Pressão de comutação (PHu)	bar	85	143		
	Pos-Pressão (PNs)	bar	70	90		

NOTA: TODOS OS PARÂMETROS DE CONTROLE (OUTPUTS) SÃO REGISTRADOS NO NETMOLDES.

